

ISBN 978-987-688-024-4

Erosión hídrica

Principios y técnicas de manejo

José Cisneros
Carmen Cholaky
Alberto Cantero Gutiérrez
Jorge González
Miguel Reynero
Alejandro Diez
Leonardo Bergesio

Coautores del Capítulo 7
Juan José Cantero
César Nuñez
Andrea Amuchástegui

Coautores del Capítulo 8
Américo Degioanni

Colección
Académico-Científica



Universidad Nacional de Río Cuarto
Facultad de Agronomía y Veterinaria
Servicio de Conservación y Ordenamiento de Tierras (SECYOT)

EROSION HIDRICA
Principios y técnicas de manejo

Autores:

CISNEROS, José Manuel; CHOLAKY, Carmen Gloria;
CANTERO GUTIERREZ, Alberto; GONZALEZ, Jorge Gustavo;
REYNERO, Miguel Angel; DIEZ, Alejandro; BERGESIO, Leonardo

Coautores del Capítulo 7

CANTERO, Juan José; NUÑEZ, César; AMUCHÁSTEGUI, Andrea

Coautor del Capítulo 8

DEGIOANNI, Américo José





Universidad Nacional de Río Cuarto
Río Cuarto - Córdoba - Argentina

Erosión hídrica : principios y técnicas de manejo /
. - 1a ed. - Río Cuarto : UniRío Editora. . , 2012.

E-Book.

ISBN 978-987-688-024-4

1. Hidrología. 2. Agronomía. 3. Erosión.
CDD 551.480 711

Fecha de catalogación: 24/10/2012

Erosión hídrica. ***Principios y técnicas de manejo***

José Cisneros, Carmen Cholaky, Alberto Cantero Gutiérrez, Jorge González, Miguel Reynero, Alejandro Diez, Leonardo Bergesio, Juan José Cantero, César Nuñez, Andrea Amuchástegui y Américo Degioanni.

Ruta Nacional 36 km 601 – (X5804) Río Cuarto – Argentina
Tel.: 54 (358) 467 6309 – Fax.: 54 (358) 468 0280
editorial@rec.unrc.edu.ar - www.unrc.edu.ar/unrc/comunicacion/editorial/

ISBN 978-987-688-024-4

Primera Edición: *Octubre de 2012*





Uni. Tres primeras letras de “Universidad”. Uso popular muy nuestro; la Uni.
Universidad del latín “universitas” (personas dedicadas al ocio del saber),
se contextualiza para nosotros en nuestro anclaje territorial y en la concepción
de conocimientos y saberes construidos y compartidos socialmente.
El río. Celeste y Naranja. El agua y la arena de nuestro Río Cuarto
en constante confluencia y devenir.
La gota. El acento y el impacto visual: agua en un movimiento
de vuelo libre de un “nosotros”.
Conocimiento que circula y calma la sed.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del libro agradecen los aportes económicos realizados para la concreción de las investigaciones y trabajos de consultoría llevados adelante por los grupos de trabajo y por el Servicio de Conservación y Ordenamiento de Tierras (SECYOT-FAV-UNRC) por las siguientes instituciones: Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNRC, Ministerio de Ciencia y Tecnología de Córdoba, CONICET, Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, Subsecretaría de Recursos Hídricos y Dirección Provincial de Vialidad de la provincia de Córdoba.

La edición de esta obra fue realizada con fondos del Programa de Apoyo al Ordenamiento Territorial Sostenible de Argentina, provenientes de los Ministerios de Educación y Agricultura y Ganadería de la Nación, en convenio con la Universidad Nacional de Río Cuarto.

Un agradecimiento especial al Ing. Agr. PhD. José Luis Panigatti, al Dr. Celio Ignacio Chagas y a la Dra. Mabel Vázquez. por los aportes realizados a esta obra, y a los Ing. Agr. Alberto Montesano (INTA Río Cuarto) y Jorge Gvozdenovich (INTA Paraná) por las fotografías facilitadas.

LISTADO DE AUTORES

José Manuel Cisneros. Ing. Agr. FAV-UNRC, MSc en Ciencias del Suelo (FAUBA), Doctor en Tecnología Agroambiental (UPM, España). Profesor Titular de Uso y Manejo de Suelos, Departamento de Ecología Agraria, FAV-UNRC.
Contacto: jcisneros@ayv.unrc.edu.ar

Carmen Gloria Cholaky. Ing. Agr. FAV-UNRC, MSc en Manejo y Recuperación de Tierras (FAV-UNRC). Profesora Adjunta de Uso y Manejo de Suelos, Departamento de Ecología Agraria, FAV-UNRC.
Contacto: ccholaky@ayv.unrc.edu.ar

Alberto Cantero Gutiérrez. Ing. Agr. UN La Plata, MSc en Suelos (Convenio: IICA- INTA- UNLP-UBA). Profesor Titular Emérito de Uso y Manejo de Suelos, Departamento de Ecología Agraria, FAV-UNRC.
Contacto: acantero@ayv.unrc.edu.ar

Jorge Gustavo González. Lic. en Geología FCEFQyN-UNRC, MSc en Planificación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (UN Comahue). Profesor Adjunto de Uso y Manejo de Suelos, Departamento de Ecología Agraria, FAV-UNRC.
Contacto: jgonzalez@ayv.unrc.edu.ar

Miguel Angel Reynero. Ing. Agr. FCA-UNC, MSc en Fotogrametría y Teledetección. (Universidad del Estado de Nueva York, USA). Profesor Adjunto de Uso y Manejo de Suelos, Departamento de Ecología Agraria, FAV-UNRC.
Contacto: mreynero@ayv.unrc.edu.ar

Alejandro Diez. Ing. Agr. FAV-UNRC, Ayudante de Primera de Uso y Manejo de Suelos, Departamento de Ecología Agraria, FAV-UNRC.
Contacto: adiez@ayv.unrc.edu.ar

Leonardo Bergesio. Ing. Agr. FAV-UNRC, Ayudante de Primera de Uso y Manejo de Suelos, Departamento de Ecología Agraria, FAV-UNRC.
Contacto: lbergesio@ayv.unrc.edu.ar

Juan José Cantero. Ing. Agr. FAV-UNRC, MSc en Recursos Naturales (FAUBA), Ph.D en Ecología Vegetal y Eco fisiología, (Universidad de Tartu, Estonia). Profesor Asociado de Botánica Sistemática Agrícola, Departamento de Biología Agrícola, FAV-UNRC.
Contacto: jcantero@ayv.unrc.edu.ar

Cesar Nuñez. Ing. Agr. FAV-UNRC, MSc Ciencias Botánicas (Universidad Austral de Chile). Profesor Asociado de Botánica Sistemática Agrícola, Departamento de Biología Agrícola, FAV-UNRC.
Contacto: cnunez@ayv.unrc.edu.ar

Andrea Amuchástegui. Ing. Agr. FAV-UNRC. Jefe de Trabajos Prácticos de Botánica Sistemática Agrícola, Departamento de Biología Agrícola, FAV-UNRC.
Contacto: aamuchastegui@ayv.unrc.edu.ar

Américo José Degioanni. Ing. Agr. FAV-UNRC. Doctor en Ciencias Ambientales (Universidad de Alcalá de Henares, España). Profesor Adjunto de Sistema Suelo, Departamento de Ecología Agraria, FAV-UNRC.
Contacto: adegioanni@ayv.unrc.edu.ar

INDICE

CAPITULO 4: Manejo agronómico de la infiltración

CAPITULO 5: Técnicas de manejo del relieve

CAPITULO 6: Técnicas de control de escurrimientos

CAPITULO 7: Control de erosión en áreas críticas. Técnicas de bioingeniería

CAPITULO 8: Teledetección y SIG para el ordenamiento de tierras sujetas a erosión hídrica

Prólogo

Es posible cambiar de partido sin tener consecuencias de diversos alcances?

Creo que es una pregunta pertinente en nuestro país, con más razón, en los tiempos que corren y somos participantes y responsables.

Hagamos un ejercicio con dos protagonistas de importancias muy disímiles, tanto en sus trascendencias, legados, prestigios, producciones, dinámicas y, puedo seguir enumerando… pero conviene centrarnos solo en algunos ítems. Qué pasa con los políticos y los suelos, cuando se van a otro partido?

Cuando un político cambia de partido podemos pensar y escuchamos muy diversos comentarios y epítetos, como: es un acto de libertad, está buscando una oportunidad mejor, es un/a transgresor/a, es una traición, es una "cooptación", otros términos no académicos para un prólogo, etc. Nuestra actitud ante este cambio es opinar, hacer sentir nuestro agrado o contrariedad, tener una conducta coherente con nuestra formación y actuar como ciudadanos responsables. Tenemos un instrumento de valor, que es positivo y lo podemos expresar: es nuestro voto en las urnas, es un derecho y una obligación, más valioso que una mera opinión positiva o exabrupto que funciona como catarsis temporaria. Creo conveniente admitirlo, es una realidad, involucrarnos y actuar en consecuencia, teniendo como referencia al pasado, evaluando el cambio y tomando nuestra responsabilidad ciudadana hacia el futuro.

Qué distinto es cuando un suelo, o parte de él, cambia de partido (o departamento o lugar). El cambio hasta puede ser de provincia o emigración hacia el mar. Este traslado no tiene retorno y es un "acto de degradación, de involución". Está ocurriendo en diversas zonas de nuestro país y desde hace décadas, lo podemos ejemplificar con la degradación, desertificación, erosión eólica, erosión hídrica, en todas las provincias de nuestro país. Según viejos diagnósticos tenemos más de 60 millones de hectáreas (53 veces la superficie de Malvinas) de suelos con diversos grados de erosión, varias de ellas llegaron a un punto de no retorno y otras en plena producción agrícola con aplicación de tecnologías adecuadas, algunas discutibles u objetables.

Como en el caso mencionado de los políticos, también tenemos instrumentos para estos cambios. Podemos, y los profesionales lo hacemos o debemos hacerlo, predecir, minimizar, revertir los procesos de degradación y muchos de nuestros maestros pregonaron y difundieron muchos conocimientos para lograrlo. Una parte muy importante de los instrumentos están disponibles y con aportes constantes desde diversas instituciones y personas para pasar a ser más y mejores productores de bienes. Producir conservando no tiene como cuello de botella a la disponibilidad de la tecnología o el conocimiento de los recursos naturales, manejo de cultivos, rotaciones, etc.

Este libro, plasmado por un destacado equipo de especialistas de una Universidad Nacional, con el cual me distinguen para que prologue, hace una puesta al día de los conocimientos que fueron creciendo en las cuatro o cinco últimas décadas. Este es un instrumento completo, concreto, actualizado y bajado a terreno en una importante región de nuestro país. Bienvenido, felicitaciones y hagamos de este aporte un gran paso para una etapa más concreta y eficiente en la aplicación de los conocimientos para una mayor producción con calidad ambiental sostenida.

Con esta obra el grupo de autores puede decir: Misión Cumplida, y mostrar que es una verdadera avanzada en las propuestas de control de erosión, desde su excelente presentación y contenido muy claro, con ejemplos sobre los factores y procesos que erosionan los suelos hasta las soluciones a niveles de predios.

No podemos decretar que nuestros suelos no cambien de lugar, pero la degradación de este recurso natural no renovable es parte de nuestra deuda interna. La tecnología está disponible y aquí se lo muestra en forma concreta, tanto a los conocimientos de las causas como a las soluciones. Este invalorable aporte está destinado para que los suelos produzcan y permanezcan en sus lugares de origen, además su trascendencia se podrá dimensionar en su justa medida cuando las normativas y los estímulos nacionales y provinciales se concreten y apliquen para un futuro con desarrollo.

Ing. Agr. José Luis Panigatti (PhD)

Presidente de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo

Capítulo 1: Introducción

1.1. La erosión de suelos en el contexto del Desarrollo Sustentable

El desarrollo económico y social de una región y del país al que pertenece está directamente relacionado con la disponibilidad de sus recursos naturales. Además, toda visión de desarrollo integrado y sostenible a través de los tiempos requiere que esos recursos naturales, y especialmente las tierras, mantengan su integridad física y capacidad productiva, en un marco de estabilidad ambiental y social.

Está ampliamente reconocido que la disponibilidad de nuevas tierras agrícolas a nivel global es escasa, por lo que la futura producción de alimentos dependerá en gran medida del mantenimiento de las condiciones de productividad de las tierras, sujetas actualmente a acelerados procesos de erosión, cuyo control es uno de los principales temas de la agenda ambiental mundial y aun más en los países en desarrollo (Ananda y Herat, 2003).

La agricultura en los países desarrollados es concebida hoy en su dimensión multifuncional (Geneletti, 2007), lo cual implica una visión basada no solamente en la producción de bienes de mercado, sino también en bienes públicos vinculados a la calidad del ambiente y al desarrollo social. El análisis de la agricultura en su dimensión estructural, en diferentes escalas (lote, ecosistema, cuenca), permite valorar la producción de bienes, y en su dimensión funcional la producción de servicios ecosistémicos, tales como el abastecimiento de agua en cantidad y calidad, la asimilación de residuos, la productividad del suelo, el mantenimiento de la biodiversidad o el control de inundaciones, entre otros (Lomas *et al*., 2005; Millenium Ecosystem Assessment, 2005).

Los servicios ecosistémicos sobre los que se hará hincapié en esta obra se relacionan con el mantenimiento de la productividad de las tierras y la regulación hidrológica a diferentes escalas. La articulación entre la producción primaria y los servicios hídricos a la sociedad lleva necesariamente al planteo de problemas de incumbencia pública y privada. Según Jobbágy (2011) “mientras la gestión de la producción primaria y la obtención de sus beneficios suele recaer en el sector privado, las iniciativas de provisión de agua o de regulación hidrológica son típicamente motorizadas por el sector público y benefician en forma directa a la mayoría de los habitantes de un territorio. Esta asimetría sectorial obliga a articular en forma ingeniosa, consensuada y políticamente madura, los servicios hídricos y la producción”.

En este sentido, la generación y adopción de políticas agropecuarias y forestales sustentables es una necesidad sentida en el mundo y en particular en la Argentina, cuyo sector agrícola-ganadero presenta un marcado dinamismo en la actualidad, aunque existen visiones encontradas sobre las potencialidades, ventajas y limitaciones del actual modelo agropecuario (Manuel-Navarrete *et al*., 2005). El modelo de agriculturización que actualmente opera en gran parte de la región pampeana y extrapampeana, genera en forma implícita impactos sobre el ambiente, por los que se desarrollan estudios y debates en los ámbitos políticos y académicos.

La *ordenación del territorio* u *ordenamiento territorial*, entendida como la acción y efecto de colocar las cosas en el lugar adecuado, aparece como el instrumento de planificación apto para lograr los múltiples objetivos involucrados en el desarrollo sustentable, considerando sus dimensiones productivas, económicas y sociales. El

ordenamiento hidrológico de las cuencas constituye uno de esos objetivos, con atención a objetivos de corto, mediano y largo plazo que básicamente consisten en minimizar la erosión, controlar procesos de inundación, de contaminación, o recuperar productividad y funciones de los ecosistemas, entre otros.

La extrapolación directa de modelos productivos desarrollados y consolidados en la región pampeana húmeda hacia ambientes más frágiles e inestables de la periferia pampeana, ha generado impactos negativos al no tenerse en cuenta las condiciones de menor resistencia y resiliencia. En la región centro-sur de Córdoba se han estimado incrementos en las tasas de erosión, lo que sucede a pesar de la adopción generalizada de la siembra directa, cuyos efectos benéficos no han logrado mitigar los impactos de cambios de uso ganaderos o mixtos a agrícolas puros (Cisneros *et al*., 2004). Esta práctica no ha sido acompañada con una estrategia de aprovechamiento del agua de lluvia. Mayoritariamente se realiza a favor de la pendiente y frecuentemente los altos niveles de compactación superficial y subsuperficial del suelo obstaculizan la infiltración del agua de lluvia, lo que aumenta el escurrimiento superficial y facilita los procesos erosivos (Cisneros *et al*., 2008).

Respecto a la actitud de los productores sobre la erosión hídrica y la necesidad de adoptar técnicas de control, el estudio realizado por Gil *et al*. (2008) concluye que una amplia mayoría declara reconocer la presencia del problema de erosión a nivel regional, en tanto que una menor proporción de productores reconoce que podría ocurrir u ocurre en su predio. También se encuentra una baja adopción de prácticas conservacionistas, cuya utilidad el productor aún no reconoce. Estas conclusiones son de gran relevancia para orientar el diseño de políticas dirigidas a fomentar la conservación de los suelos. La firme persistencia de la mayoría de los productores a no aplicar prácticas de conservación de suelo por considerarlas innecesarias, es posiblemente el obstáculo de mayor importancia para su adopción, mayor que los costos o cualquier otro argumento. En función de estas conclusiones, la política de conservación de suelo requiere valorizar las tareas de capacitación y extensión como ejes estratégicos, dirigidos a poner de relieve los efectos de todas las formas de erosión y la importancia que tiene para su control la aplicación de las técnicas de conservación de suelo (Gil *et al*., 2008).

1.2. Finalidad, objetivos y destinatarios de esta obra

Esta obra surge como síntesis de los resultados de investigaciones y trabajos experimentales —desarrollados muchos de ellos con participación de estudiantes universitarios y productores agropecuarios—, tareas de extensión y divulgación técnica sobre suelos, geomorfología, red de drenaje, sistemas de producción y control de los procesos de degradación de las tierras que han realizado docentes e investigadores de la Universidad Nacional de Río Cuarto durante más de 30 años en el centro y sur de Córdoba.

Esta región presenta un excelente marco geográfico para el desarrollo de los trabajos de ordenamiento territorial, control de erosión hídrica, erosión eólica, manejo de las condiciones físico-morfológicas de los suelos y de ambientes hidro-halomórficos, teniendo en cuenta su alta diversidad ambiental, con transiciones entre áreas subhúmedas y semiáridas del centro de Argentina y una diversidad de ambientes serranos, llanuras onduladas con intensos procesos de erosión hídrica, integrados a planicies y depresiones receptoras de escurrimientos de agua y sedimentos que colmatan humedales, mineralizan freáticas y salinizan, anegan e inundan diversas áreas de la región.

La finalidad de esta obra es contribuir al desarrollo de los territorios sujetos a procesos de erosión, hídrica en especial, basada en el conocimiento acumulado de los ambientes de la región pampeana marginal del centro-sur de Córdoba, a partir del cual se aporta una síntesis conceptual, metodológica y operativa para emprender el manejo de cuencas, dentro del proceso de ordenamiento territorial que requiere la sociedad.

Algunos objetivos que se pretende alcanzar con esta obra son:

a. Aportar una visión general de las técnicas de ordenamiento de tierras sujetas a erosión hídrica, integrada a escala de lote, predio y cuenca hidrográfica;
b. Discutir los fundamentos de las técnicas agronómicas, estructurales y bioingenieriles para control de escurrimientos y pérdidas de suelo como medios para lograr una producción sustentable;
c. Introducir al lector en el uso de modelos de simulación y tecnologías de la información y comunicación (TICs), de utilidad en el manejo y ordenamiento de tierras.
d. Brindar herramientas operativas prácticas para el diseño y dimensionamiento de técnicas de control de erosión,

Cada capítulo se desarrolla en un lenguaje que describe con claridad cada fenómeno estudiado, aportando las bases científicas y metodológicas que permiten la comprensión de los procesos y fundamentos para decidir la aplicación de las tecnologías más apropiadas a cada situación. Al final de cada capítulo se incluyen referencias bibliográficas básicas que posibilitan al lector la ampliación del tema.

Esta obra está destinada a alumnos avanzados, docentes investigadores y profesionales de las ciencias agrarias, ciencias de la tierra y ciencias ambientales, que desarrollen estudios y tareas vinculadas con la producción agropecuaria, el ordenamiento territorial, la evaluación de impacto ambiental y la planificación del desarrollo rural en general. Para su mejor aprovechamiento se requieren conocimientos básicos de suelos, botánica agrícola, maquinarias agrícolas, tecnología de cultivos, agroclimatología e informática.

1.3. Contenidos y organización

La obra está dividida en 8 capítulos —incluida esta Introducción— en los que se discuten principios básicos y técnicas de manejo.

El Capítulo 2 presenta los conceptos básicos de hidrología superficial. Se exponen modelos para la estimación de escorrentía y caudales máximos en cuencas, como base para el dimensionamiento de las estructuras de control. Se describen además los principales comandos del modelo de simulación hidrológica HEC-HMS.

El Capítulo 3 discute la física de los diferentes tipos de erosión hídrica y sus principales causas y consecuencias. Se analiza uno de los modelos mas utilizados para evaluación de las tasas de erosión laminar y en surcos: la ecuación USLE, en su versión original, y RUSLE2, una versión revisada e integrada en un paquete informático.

En el Capítulo 4 se tratan las principales técnicas agronómicas de control de los escurrimientos mediante el manejo de las tasas de infiltración del agua en el suelo. El uso de coberturas, control de compactaciones y manejo de la materia orgánica forman el núcleo del capítulo.

El contenido del Capítulo 5 se centra en las técnicas de manejo del relieve, orientadas a sistematización a escala de lote o parcela. Se detallan los principios de funcionamiento, alcances y procedimientos para el diseño y ejecución de estructuras con distintos grados de complejidad acorde a las situaciones problema, tales como el trazado de líneas cortando la pendiente o levantamiento de terrazas de desagüe, entre otras.

El Capítulo 6 amplía la dimensión del trabajo a nivel de cuenca hidrográfica, a fin de discutir técnicas de conducción controlada de los escurrimientos, manejo de la erosión en cárcavas, diseño de reguladores de escurrimiento o pequeños embalses de tierra, entre otras.

El Capítulo 7 presenta conceptos básicos de bioingeniería, basada en el uso de vegetación para la estabilización de suelos en lugares críticos, como áreas de taludes o bordes de ríos, y técnicas que integran principios de la ingeniería de materiales –naturales y de fábrica– y de la ecología del paisaje, con fines de control de erosión.

El Capítulo 8 pasa revista a las actuales tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en las que se apoya la elaboración de proyectos de ordenamiento de tierras y control de erosión. Se discuten conceptos básicos de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección –mediante imágenes aéreas y satelitales– y el uso de herramientas informáticas actualmente disponibles.

Los autores tienen el íntimo deseo, y la esperanza, que esta obra ayude a fortalecer y desarrollar la conciencia de respeto hacia la integridad de las tierras y a su correcto uso y manejo. De ello dependerá, en gran medida, el desarrollo futuro de la República Argentina.

Bibliografía

Ananda, J. y G. Herath. 2003. Soil erosion in developing countries: a socio-economic appraisal. J. Environ. Manage. 68:343-353.

Cisneros, J.M.; Cantero, A.; Degioanni, A.; Becerra,V.H. y M.A. Zubrzycki. 2008. Capítulo III. Producción, Uso y Manejo de las Tierras. En: de Prada, J. D. y J. Penna (Eds.) Percepción económica y visión de los productores agropecuarios de los problemas ambientales en el sur de Córdoba, Argentina. Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales Nº 08. IES INTA. Pp 31-44.

Cisneros, J.M.; De Prada, J.D.; Degioanni, A.; Cantero Gutiérrez, A.; Gil, H.; Reynero, M.A.; Shah, F. y B. Bravo Ureta. 2004. Erosión hídrica y cambio de uso de los suelos en Córdoba. Evaluación mediante el modelo RUSLE 2. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná (Entre Ríos), En Actas del Congreso, trabajo completo en CD.

Geneletti, D. 2007. An approach based on spatial multicriteria analysis to map the nature conservation value of agricultural land. J. Environ. Manage. 83: 228-235.

Gil, H.A.; de Prada, J.D.; Hernandez, J.; Pereyra, C. y A.R. Angeli. 2008. Análisis de la Percepción del Productor sobre la Problemática Ambiental. En: de Prada J.D. y J. Penna (Eds.) Percepción económica y visión de los productores agropecuarios de los problemas ambientales en el Sur de Córdoba, Argentina. Nº 08. IES INTA. 94 pp.

Jobbágy, E.G. 2011. Servicios hídricos de los ecosistemas y su relación con el uso de la tierra en la llanura chaco-pampeana. En: Paruelo, Jobaggy, Laterra (Eds.)

Expansión e intensificación agrícola en Argentina: Valoración de bienes y servicios ecosistémicos para el ordenamiento territorial. Ediciones INTA.

Lomas P.L.; Martín B.; Louis C.; Montoya D.; Montes C. y S. Álvarez. 2005. Guía práctica para la valoración económica de los bienes y servicios ambientales de los ecosistemas. Serie Monografías N° 1. Publicaciones de la Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez.

Manuel-Navarrete, D.; Gallopin, G.; Blanco, M.; Diaz-Zorita, M.; Ferraro, D.; Herzer, H.; Laterra, P.; Morello, J.; Muráis, M.; Pengue, W.; Piñeiro, M.; Podestá E.; Satorre, E.; Torrent, M.; Torres, F.; Viglizzo, E.; Caputo, M. y A. Celis. 2005. Análisis sistémico de la agriculturización en la pampa húmeda argentina y sus consecuencias en regiones extrapampeanas: sostenibilidad, brechas de conocimiento e integración de políticas. CEPAL. Serie Medio Ambiente y Desarrollo n° 118. Santiago de Chile.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC.

Capítulo 2:
Conceptos de hidrología superficial

2.1. Procesos hidrológicos básicos

Los principales agentes causantes de la erosión hídrica son la energía cinética de las precipitaciones y el agua que circula por la superficie, que con una cierta velocidad crítica desprende y pone en movimiento a las partículas del suelo. El escurrimiento superficial es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico (Figura 2.1).

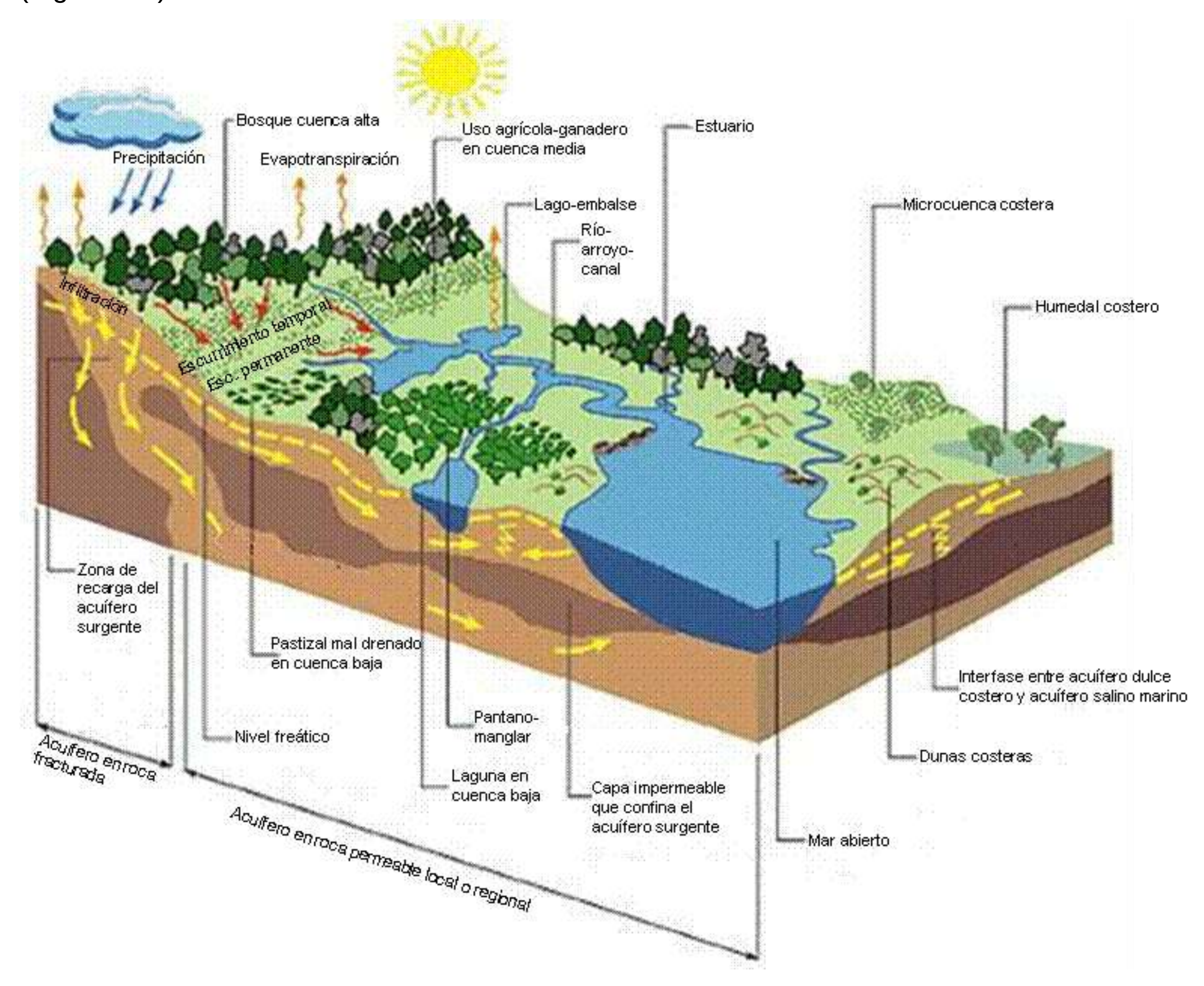


Figura 2.1: El ciclo hidrológico. Principales componentes y procesos hidrológicos a escala tridimensional en una cuenca hidrográfica (Modificado de UNSW, 2012).

El ciclo hidrológico de la Figura 2.1 muestra los componentes principales de la circulación del agua en una cuenca. Se indican los escurrimientos superficiales temporarios y permanentes, los escurrimientos subterráneos libres (freáticos) o confinados (artesianos). Los diferentes tipos de cuencas (altas, medias, bajas), y los elementos de almacenamiento y regulación (ríos, lagunas, mar abierto).

Dentro de este ciclo, interesa analizar con mayor detalle el escurrimiento superficial, el cual es la resultante de una serie de procesos hidrológicos dependientes unos de otros. Se analizarán en detalle los siguientes:

- Interceptación por parte del vegetal,
- Retención o almacenaje superficial,
- Escurrimiento superficial,
- Infiltración,
- Detención superficial,

2.1.1. Interceptación

La interceptación o intercepción es la parte de la precipitación que no llega al suelo directamente, ya que es el follaje de las plantas lo que intercepta la dirección de la gotas de lluvia. Parte de ésta es almacenada y más tarde es perdida por evaporación no formando parte del escurrimiento superficial, y otra parte alcanza la superficie del suelo por escurrimiento desde las hojas y tallos.

Su magnitud se ve afectada por varios factores, entre ellos: tipo de vegetación, intensidad de la lluvia, estado de crecimiento de la cubierta vegetal, estación del año y velocidad del viento.

Obviamente el tipo de vegetación que crece en un área y la intensidad de precipitación ejercen una marcada influencia en la cantidad de agua que puede interceptar en sus hojas y tallos.

Durante una lluvia, la interceptación aumenta exponencialmente hasta alcanzar un valor máximo (IC max), el cual es difícil de determinar, aunque se han podido establecer ciertos rangos de valores para diferentes tipos de vegetación (Tabla 2.1). Si bien estos rangos de valores pueden resultar bajos para una lluvia determinada, su efecto acumulado sobre el total de precipitaciones anuales, puede ser considerable.

2.1: Capacidad de almacenaje por interceptación de diferentes tipos de vegetación (Tomado de Morgan y Rickson, 1995).

Tipo de vegetación	IC max (mm)
Festuca	**1,2**
Rye Grass	**2,5**
Bosque de pinos	**1,0**
Bosque tropical	**0,8-2,5**
Soja	**0,7**
Trigo	**3,0**
Maíz	**0,8**
Alfalfa	**2,8**
Monte frutal (manzano)	**0,5**

El otro factor que interviene en la intercepción es el estado de crecimiento en el momento considerado; los cultivos tempranos, en estado pequeño ejercen poco efecto

mientras que en su madurez pueden interceptar una significativa proporción de la precipitación. Así asumiendo que la lluvia cae verticalmente, el volumen de lluvia interceptada (IC) puede calcularse a través de la siguiente relación:

$$IC = lluvia \times CC$$

donde CC = porcentaje de cobertura por el canopeo.

La estación del año tiene un importante efecto sobre el estado del canopeo, sobre la ocurrencia y tipo de precipitaciones, (lluvias de baja intensidad son interceptadas en mayor magnitud que las de alta intensidad), sobre la ocurrencia de vientos y la temperatura ambiente, factores que influyen en la posibilidad de captación de lluvia por parte del vegetal y en la evaporación directa desde el follaje.

La velocidad del viento es importante por dos razones: primero, porque afecta a la evaporación desde la superficie de las hojas, una vegetación de alta densidad de hojas, como en un bosque. En estas condiciones se evapora una significativa cantidad de agua durante la lluvia, y a medida que aumenta la velocidad del viento, este proceso, se incrementa. Segundo, porque a través de la agitación de las hojas parte del agua interceptada llega al suelo, siendo menor la interceptación a medida que aumenta la velocidad del viento.

Los aspectos de manejo tienen influencia sobre la interceptación: la densidad de siembra, el distanciamiento entre hileras, la dirección de siembra, los genotipos vegetales utilizados, la labranza utilizada (en función de los restos orgánicos que quedan en superficie); factores todos que determinan la velocidad con que el suelo es cubierto.

Desde el punto de vista del fenómeno erosivo, la vegetación provee una capa protectora o buffer entre la atmósfera y el suelo; por lo que la interceptación reviste especial importancia. El objetivo que se persigue es disminuir la energía cinética de la precipitación y su efecto desagregante sobre el suelo, evitando los encostramientos superficiales (“planchado”) y posterior escurrimiento de agua y suelo.

El efecto destructor de las gotas de lluvia sobre un suelo con poca cobertura vegetal de muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2: Efecto de la gota de lluvia sobre el suelo. Zona rural Rodeo Viejo, dpto. Río Cuarto, Córdoba.

2.1.2. Retención superficial

El proceso de retención superficial hace referencia al agua retenida en microdepresiones de la superficie del suelo.

Al final de la lluvia, el agua puede infiltrar o evaporarse. El agua retenida forma parte del escurrimiento superficial en caso de existir flujos hipodérmicos dentro del perfil que pasen a formar parte del flujo superficial o cuando la lámina de agua supere las dimensiones de la depresión y la pendiente regional sea pronunciada.

Los factores que controlan la cantidad de agua retenida son la microtopografía y la pendiente general del terreno. El principal factor es el microrelieve superficial debido a las prácticas de cultivo que incluyen tanto al laboreo como a aquellas otras que modifican el desarrollo de los cultivos. Estas técnicas culturales son estacionales por naturaleza, como lo es la agresividad del clima; por lo tanto, la época de su realización modifica la retención superficial del agua.

El factor “pendiente general” del lugar influye a través de su gradiente, ya que a medida que aumenta con una misma rugosidad disminuye el volumen de agua retenida en superficie. Este factor es de menor jerarquía respecto al microrelieve, aunque es imprescindible considerarlo al plantear las técnicas que tiendan a incrementar la retención. La eficiencia de la técnica será máxima cuando los microrelieves se hagan cortando la pendiente principal del lote o en curvas de nivel, de este modo la rugosidad creada retiene eficazmente el agua.

El encharcamiento del suelo se muestra en la Figura 2.3. En este caso, las condiciones superficiales no son las óptimas para maximizar la retención superficial, ya que las labores están a favor de la pendiente y los microrelieves son casi nulos.



Figura 2.3: Encharcamiento del suelo. Cuenca La Colacha, dpto. Río Cuarto, Córdoba.

2.1.3. Detención superficial

La detención superficial hace referencia al agua detenida temporariamente sobre la superficie, es decir que una vez puesta en movimiento es frenada por obstáculos. Su movimiento es necesario para que ocurra el escurrimiento, por lo tanto podría ser considerada como una componente del escurrimiento, más que como un proceso separado, pero a los fines de clarificar el tema se discuten por separado.

Los factores que controlan el detenimiento superficial son: microrelieve superficial, vegetación, pendiente general, distribución de la lluvia y topografía general de la cuenca. El microrelieve superficial controla las formas de la sección de flujo de agua desde los "canales" pequeños hasta las vías principales de flujo de agua. De este modo todos los elementos que influyen sobre la retención (prácticas culturales, época del año y patrón de erosión), también pueden considerarse que afectan el detenimiento superficial.

La vegetación debe incluirse debido a que determina las prácticas culturales empleadas y a que las hojas y tallos aumentan la rugosidad de la superficie.

La pendiente general influye fuertemente en el volumen de agua detenida en superficie; cuanto mayor es, más alta es la velocidad de escurrimiento y menor es el volumen de detención requerido para mantener un dado caudal de flujo.

La topografía general de la cuenca afecta la cantidad de agua que pasa de un área elemental hacia otras adyacentes. De este modo el escurrimiento de un lugar es el producto del aportado por las precipitaciones locales y del que le aportan otras áreas. Son más evidentes en los límites de los lotes en los que se detiene el flujo y depositan sedimentos y rastrojos por la vegetación y alambrados perimetrales. Por el contrario, el escurrimiento se acelera al llegar a los caminos, en los cuales hay muy poca rugosidad; prueba de ello es el estado de deterioro en el que se encuentran actualmente los caminos de la región centro y sur de Córdoba.

2.1.4. Infiltración

Para la mayoría de las cuencas, la infiltración es el componente hidrológico más importante y es determinante de la forma del hidrograma de una creciente (gráfico de coordenadas (x,y) en donde se representa el caudal escurrido en relación al tiempo).

Los principales factores que la controlan son: características internas del perfil (textura, estructura, permeabilidad, tipo de límite entre horizontes y peso específico aparente de los horizontes subsuperficiales), condición superficial (cubierta vegetal y estabilidad estructural, relacionadas directamente con la presencia de sellos o costras), humedad del suelo, estación del año, intensidad y distribución de la precipitación en el año.

La Figura 2.4 muestra la relación entre la velocidad de infiltración y la textura del suelo.

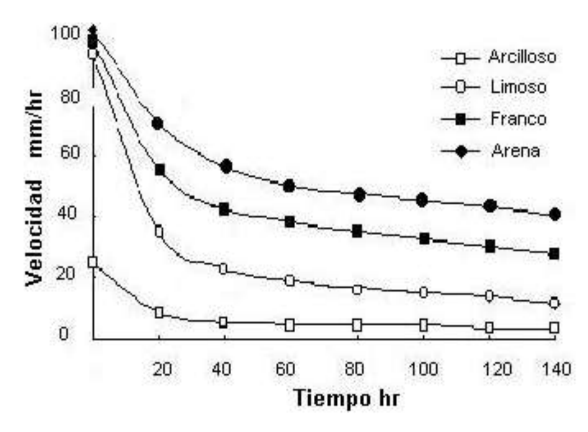


Figura 2.4: Curvas de infiltración para diferentes texturas de suelos.

La condición superficial es un factor de fundamental importancia en el manejo de la velocidad de infiltración de los suelos. Las experiencias indican que unos pocos milímetros superficiales de suelo son los responsables de la entrada de agua al perfil. Influyen sobre ella tres aspectos: las prácticas culturales (presión de laboreo y condiciones operativas: momento, dirección, velocidad y profundidad de las labores; diseño y densidad de siembra), el tipo de vegetación (morfología y densidad de crecimiento) debido a su efecto de protección mecánica de la superficie contra el impacto de la gota de lluvia, disminuyendo la cantidad de escurrimiento generado durante una tormenta e incrementando el tiempo en que el escurrimiento comienza a ocurrir.

El otro aspecto que influye sobre la condición superficial del suelo es la intensidad de la precipitación debido a su relación con el tamaño de gota de agua. El tamaño promedio de la gota de lluvia generalmente tiende a aumentar con la intensidad de la misma. Al aumentar el tamaño de gota, aumenta la energía de impacto y por lo tanto, causa un mayor deterioro de la estructura superficial.

2.1.5. Escurrimiento superficial

Como ya se mencionó, el escurrimiento superficial es la resultante del balance de los procesos anteriores y por lo tanto es afectado por los mismos factores antedichos (Figura 2.5).

La diferencia entre la precipitación total y la interceptada es la precipitación que llega al suelo. Si ésta supera la capacidad de infiltración y retención se forma una delgada lámina de agua que comienza a correr por gravedad a través de la pendiente.

La diferencia entre la intensidad de lluvia (mm/h) y la capacidad de infiltración es el exceso de lluvia para producir el escurrimiento superficial.

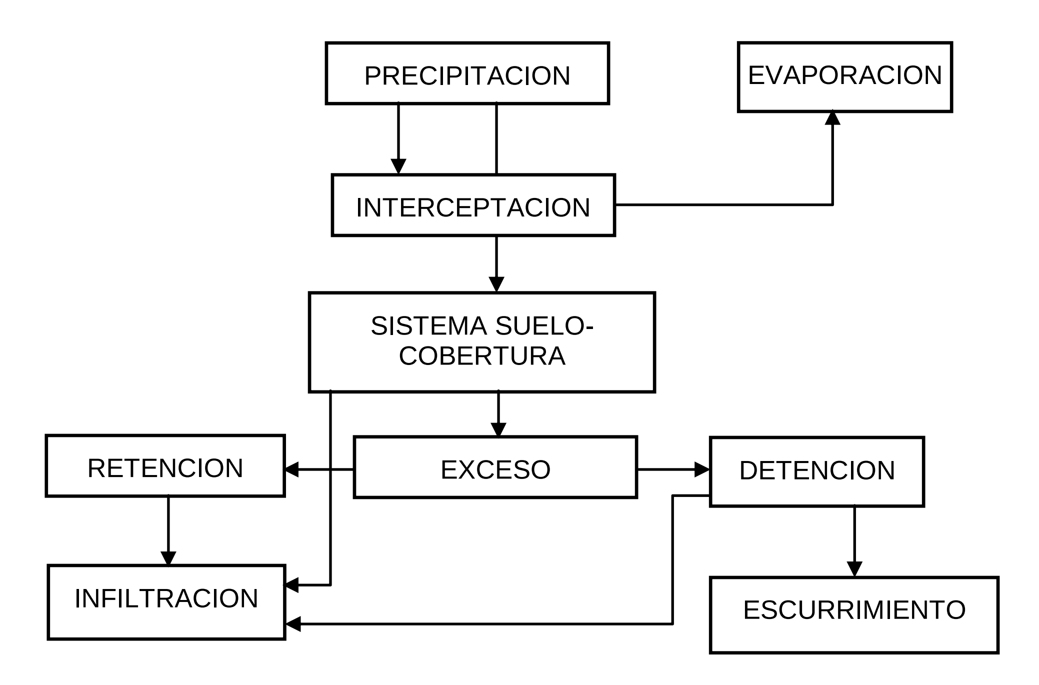


Figura 2.5: Procesos hidrológicos durante una precipitación intensa.

2.1.6. Dinámica de los procesos hidrológicos en el tiempo

La variación en el tiempo de los procesos hidrológicos durante una lluvia constante se muestra en la Figura 2.6.

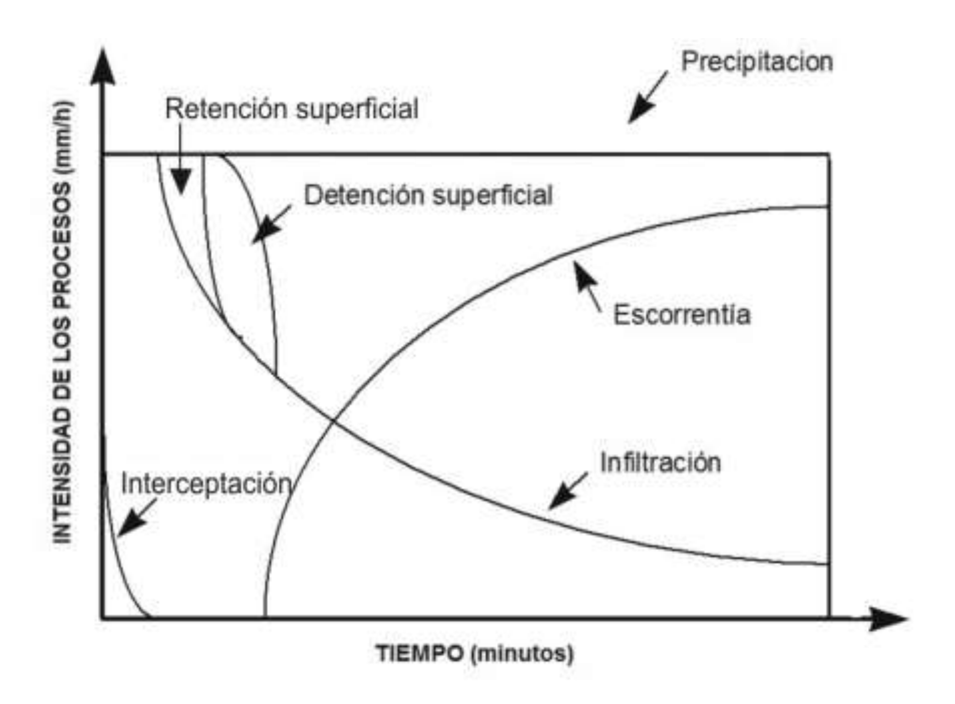


Figura 2.6: Esquema de los procesos hidrológicos una vez comenzada la lluvia.

Tan pronto comienza la precipitación, la vegetación impide que una parte de ella llegue a la superficie; se denomina a este proceso interceptación. Si la cobertura no es completa, parte de la lluvia alcanza la superficie del suelo, una parte comienza a infiltrar y el resto comienza a llenar las depresiones del microrelieve. Una vez que las demandas de almacenaje en depresiones han sido superadas, satisfecha la interceptación y superada la velocidad de infiltración, el agua comienza a acumularse en una condición de detención superficial y el escurrimiento empieza.

Es importante reconocer estos principios al evaluar el impacto de las diferentes técnicas de manejo sobre el escurimiento y sobre cuál de los procesos se actúa.

Como se desprende de la Figura 2.6, la intensidad máxima de escurrimiento es la diferencia entre la lluvia, interceptación, retención y detención superficial y la velocidad de infiltración, siendo este factor quién define la cantidad de agua perdida y la intensidad del proceso erosivo.

2.2. Métodos de estimación del escurrimiento superficial

Cuando se plantean propuestas de control del proceso de erosión hídrica, puede ser necesario proyectar obras, estructuras y\o prácticas mecánicas como parte del planeamiento para lograrlo. Dichas obras deben tener una óptima funcionalidad acorde al objetivo planteado, es decir, una capacidad adecuada a las condiciones del medio para la cual fue proyectada e implicar el mínimo costo, razón por lo que resulta

imprescindible la cuantificación de los caudales máximos de escurrimiento, para su correcto diseño y dimensionamiento.

2.2.1. Método de la fórmula Racional o de Ramser

La fórmula es llamada Racional porque las variables que intervienen tienen consistencia numérica. Se puede aplicar en cuencas de hasta 1.300 has de superficie aproximadamente.

La fórmula de predicción del pico de escurrimiento se expresa de la siguiente forma:

$$Qp = \frac{C \times I \times A}{360}$$

donde:

Qp = caudal pico de escurrimiento (m^3/s)**;**

C = coeficiente de Escurrimiento (adimensional)**;**

I = Intensidad de la lluvia (mm/h)**;**

A = Area de la cuenca (ha)**.**

El valor consignado en el denominador de la fórmula se obtiene por la conversión de las unidades de la intensidad de lluvia (I) y área de la cuenca (A):

$$I\ en\ \frac{mm}{h} = \frac{0.001\ m}{3600\ s}$$

$$A\ en\ ha = 10000\ m^2$$

El producto de

$$I \times A = \frac{0.001\ m}{3600\ s} \times 10000\ m^2$$

$$\frac{10\ m^3}{3600\ s} = \frac{1}{360} \times \frac{m^3}{s}$$

El grado de exactitud que se obtenga con el empleo de la fórmula racional, no puede ser mayor que el grado de precisión con que se haya determinado el elemento menos exacto. Los elementos más difíciles de evaluar son el coeficiente de escurrimiento (C) y el tiempo de concentración (Tc).

Coeficiente de escurrimiento (C)

Es la relación que existe entre el volumen escurrido y el volumen llovido.

$$C = \frac{volumen\ escurrido}{volumen\ llovido}$$

Es un factor adimensional, que fluctúa entre 1 y 0 cuando escurre todo o nada de lo llovido, respectivamente.

Debido a que el coeficiente de escurrimiento no es un factor constante, sino que varía con la intensidad de la lluvia y las condiciones de la cuenca, su determinación es aproximada. Cuando no existen datos de aforo a la salida de la cuenca, la estimación del factor C se basa en la utilización de coeficientes asignados a características climáticas, de suelos, pendientes, vegetación, prácticas de manejo, uso, etc., en cuencas en las que se cuenta con datos de aforo.

Los valores de estimación del coeficiente C por diferentes autores, según distintas características de la cuenca se muestran en las Tablas 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5.

Tabla 2.2: Coeficientes de escurrimiento según Ramser (1929).

Uso del suelo	**Relieve (% pendiente)**	**Coeficiente C**
Ondulada,cultivada	5-10	0,60
Montañosa,cultivada	10-20	0,72
Ondulada,con pastos	5-10	0,36
Montañosa,con pastos	10-20	0,42
Ondulada,con bosques	5-10	0,18
Montañosa, con bosque	10-20	0,21

Estos valores de C resultan del ajuste ponderado de todos los factores variables que influyen en la cifra de la escorrentía.

Tabla 2.3: Coeficientes de escurrimiento según Schwab *et al.*(1990).

	Textura		
Condiciones de relieve y vegetación	**Franco-arenoso**	**Franco-limoso y franco-arcilloso**	**Arcilloso**
BOSQUE O MONTE			
Plano (0-5%)	**0,10**	**0,30**	**0,40**
Ondulado (5-10%)	**0,25**	**0,35**	**0,50**
Colinado (10-30%)	**0,30**	**0,50**	**0,60**
PASTURA			
plano(0-5%)	**0,10**	**0,30**	**0,40**
Ondulado (5-10%)	**0,16**	**0,36**	**0,55**
Colinado (10-30%)	**0,22**	**0,42**	**0,60**
CULTIVADO			
plano(0-5%)	**0,30**	**0,50**	**0,60**
ondulado(5-10%)	**0,40**	**0,60**	**0,70**
Colinado (10-30%)	**0,52**	**0,72**	**0,82**

Un método más apropiado es el que propone Chow *et al.* (1993, Tabla2.4.), ya que contempla más variables para la estimación que el resto de los autores: edáficas, de relieve, de lluvia y de uso de la tierra.

Tabla 2.4: Coeficientes de escorrentía (Chow *et al.* 1993)

	Período de retorno (años)					
Característica de la superficie	**2**	**5**	**10**	**25**	**50**	**100**
Área s Urbanas						
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95
Concreto/techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97
Zonas verdes (Jardines, Parques, etc)						
Condiciones pobre (cubierta < 50%)						
Plano (0 - 2%)	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47
Promedio (2 - 7%)	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53
Pendiente superior al 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55
Condiciones promedio (cubierta 50 al 75%)						
Plano (0 - 2%)	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41
Promedio (2 - 7%)	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49
Pendiente superior al 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53
Condiciones buena (cubierta > 75%)						
Plano (0 - 2%)	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36
Promedio (2 - 7%)	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46
Pendiente superior al 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51
Áreas rurales						
Áreas de cultivos						
Plano (0 - 2%)	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47
Promedio (2 - 7%)	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51
Pendiente superior al 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54
Pastizales						
Plano (0 - 2%)	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41
Promedio (2 - 7%)	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49
Pendiente superior al 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53
Bosques						
Plano (0 - 2%)	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39
Promedio (2 - 7%)	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47
Pendiente superior al 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52

Tabla 2.5: Factores que producen el escurrimiento y coeficientes parciales (Temez, 1991).

FACTORES	**CATEGORIAS**			
Intensidad de la lluvia (mm/h)	70-100 **(0,30)**	70-50 **(0,25)**	50-30 **(0,18)**	30-25 **(0,12)**
Relieve	Empinado (S> 20%) **(0,10)**	muy ondulado (S=20-10%) **(0,05)**	ondulado (S=10-5%) **(0,02)**	relativamente plano (S=5-0%) **(0,01)**
Retención por la superficie	insignif. **(0,10)**	pocas depresiones **(0,07)**	algunas depresiones y zanjas **(0,05)**	retención por estruc-turas que cubren el 90% del área **(0,02)**
infiltración	roca sólida **(0,25)**	textura arcillosa **(0,18)**	textura franca-arenosa a franco-limosa **(0,10)**	textura arenosa, suelo profundo **(0,05)**
Cubierta	suelo desnudo **(0,25)**	cultivos limpios, menos de 10% de buenas pasturas **(0,20)**	50% de suelo cubierto **(0,10)**	90% de suelo cubierto **(0,05)**
Sumatoria	**1,00** (extremo)	**0,75** (alto)	**0,45** (normal)	**0,25** (bajo)

Como se observa en la Tabla 2.5, el método considera cinco factores que afectan el escurrimiento:

- Intensidad de lluvia,

- Relieve,
- Retención superficial,
- Infiltración,
- Cubierta vegetal

Se establecen cuatro categorías para cada factor y con cada una de ellas se va integrando el coeficiente de escurrimiento "C", para una situación dada.

Ejemplo de estimación de C, mediante el método propuesto por Temez (1991).

Se discute un ejemplo para la región de la Pampa Ondulada con lluvias de una intensidad de 60 mm/h, pendientes entre 1 y 4%, pocas depresiones superficiales, suelos de textura franco-limosas y cultivos anuales en casi toda la superficie. De la Tabla 2.5. se obtienen los siguientes valores:

- *Lluvia* *0,25*
- *Relieve* *0,01*
- *Retención* *0,07*
- *Infiltración* *0,10*
- *Cubierta* *0,20*
- ***C Total*** ***0,63***

Por lo tanto, el factor "C" de escurrimiento para las condiciones planteadas es de 0,63, lo que prácticamente significa que un 63% de lo que llueve, escurre.

Si bien estos coeficientes fueron medidos en otras áreas, su extrapolación resulta útil para la estimación de un coeficiente "C" para las condiciones locales, pudiéndose tomar valores intermedios a los asignados a cada categoría de factor en los casos que se considere apropiado.

Además, existe un método gráfico para determinar el factor "C" (Schwab et al.,1990), a partir de la intensidad de lluvia corregida según el tiempo de concentración en la cuenca. Se consideran diferentes situaciones de uso y manejo (Figura 2.7):

- Maíz con prácticas comunes de manejo;
- Maíz con prácticas mejoradas;
- Pastura permanente;
- Pradera de dos años;
- Trigo con prácticas mejoradas.

Este método hace referencia a los "Grupos hidrológicos de Suelos", cuya definición se efectúa al desarrollar el método del Soil Conservation Service (SCS) de USDA, 1968.

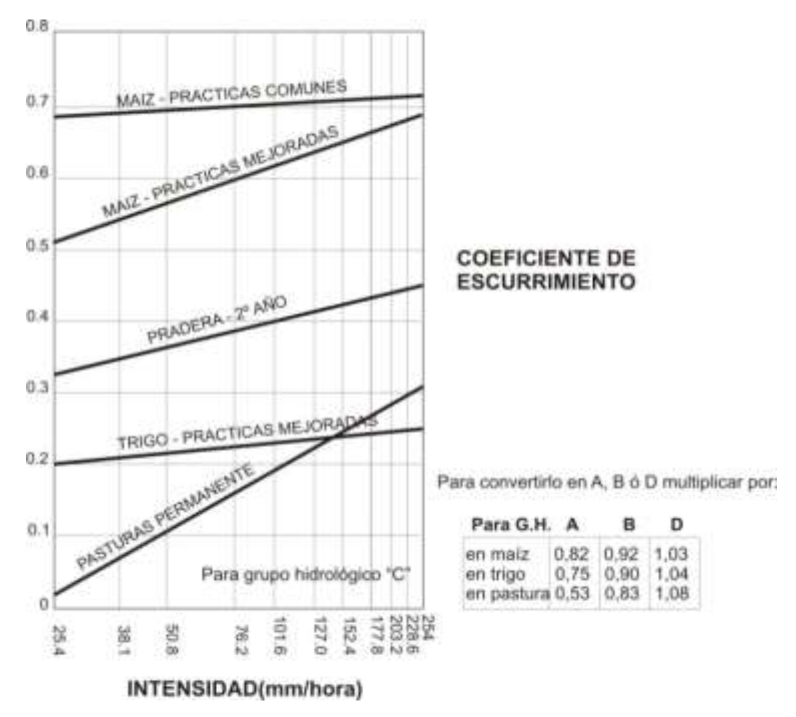


Figura 2.7: Método gráfico para estimar el coeficiente "C" de escurrimiento (USDA, 1968).

Intensidad de la lluvia (I)

La intensidad "I", corresponde a la intensidad máxima de lluvia para una duración igual al tiempo de concentración en la cuenca.

El Tiempo de concentración (Tc) se define como el tiempo máximo requerido por el escurrimiento, para llegar a la salida de la cuenca desde cualquier punto de la misma. En otras palabras es el tiempo que tarda el agua proveniente de toda la cuenca, en concentrarse en el punto de salida de la misma.

En función de lo expresado resulta necesario considerar el Tc para estimar la intensidad máxima de precipitación en la cuenca estudiada, de modo de convertir una característica climática de una región (intensidad de lluvia obtenida a través de una serie estadística), en una característica hidrológica propia de la cuenca considerada.

Si se considera un frente de lluvias disperso que cubre la totalidad del área de la cuenca, llegará un momento en que toda la superficie estará aportando escurrimiento. En términos generales y haciendo un división del área en diferentes fracciones (Figura 2.8), una vez comenzada la lluvia, en un tiempo t1, comenzará a llegar a la salida de la cuenca el escurrimiento proveniente de la porción más próxima a la misma (f1), luego en el tiempo t2, llegará el escurrimiento proveniente de las fracciones f1+f2 y así sucesivamente hasta que en el tiempo tn (fin de la lluvia), que es igual al Tc, llega el agua escurrida desde las fracciones f1 hasta la fn, es decir de la totalidad de la cuenca. Es por esta causa que para una situación determinada, para obtener el caudal máximo de escurrimiento, se toma aquella intensidad de lluvia que se haya producido en un tiempo igual al tiempo de concentración de la cuenca.

Por otro lado, dado que las relaciones intensidad/duración de las lluvias demuestran que la intensidad decrece cuando la duración es mayor, la máxima intensidad y por lo tanto el máximo caudal de escurrimiento, se dará en una tormenta cuya duración mínima se corresponda con el tiempo de contribución de toda la cuenca al escurrimiento, (Tiempo de concentración).

El hecho de tomar una duración de lluvia inferior o superior al tiempo de concentración (Tc), llevará a incurrir en errores en la estimación del caudal pico (Qp), ya sea por una subestimación o sobrestimación del mismo, respectivamente

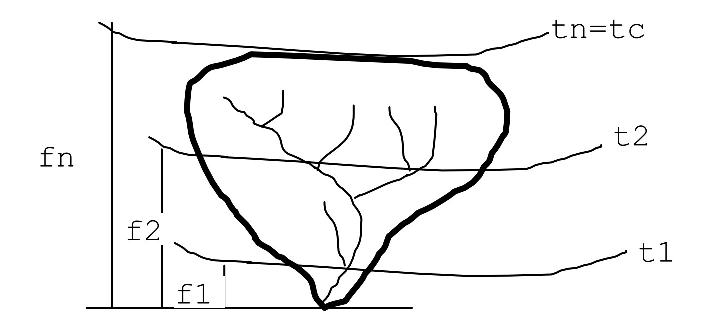
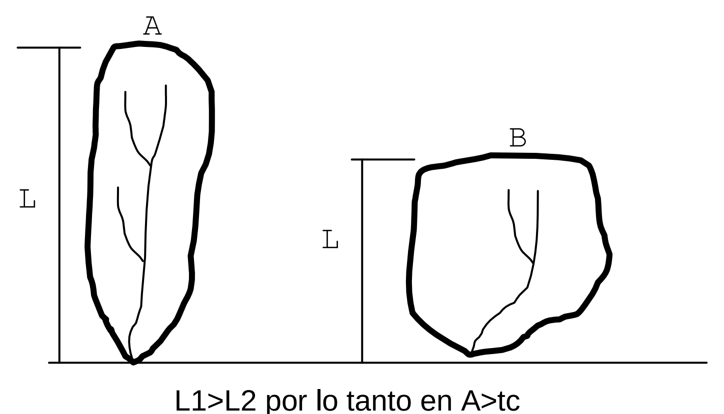


Figura 2.8: Esquema de llegada al punto de salida de la cuenca del agua de escurrimiento, para una precipitación dada.

Entre las características de la cuenca que determinan su tiempo de concentración se pueden mencionar:

- **Tamaño**: a mayor tamaño, mayor será el tiempo de concentración;
- **Topografía**: la complejidad, longitud y gradiente de las pendientes definen la topografía de un área e influyen en el tiempo de concentración. Relieves ondulados, con pendientes complejas, determinan tiempos de concentración menores que los de cuencas uniformes y planas.
- **Forma**: a igualdad de factores, superficie, patrón de drenaje, etc., el tiempo de concentración depende de la distancia entre el punto más lejano y la salida de la cuenca, en otras palabras de la forma de la cuenca. Así cuencas largas y delgadas presentan un Tc mayor que las cuencas redondas o cuadradas. (Figura 2.9).



L1>L2 por lo tanto en A>tc

Figura 2.9: Esquema sobre el efecto de las características físicas de la cuenca sobre el Tc.

La exactitud en la estimación del tiempo de concentración depende de la exactitud con que se pueda estimar la trayectoria recorrida y la velocidad de la corriente.

Algunos de los métodos usados para el cálculo de este parámetro son:

Fórmula de Bransby-Williams, el Tc se expresa como:

$$Tc = \frac{L}{1.5 \times D} \times \frac{M^2}{F}$$

donde:

Tc= tiempo de concentración, en minutos;

L= distancia máxima a la salida, en km;

D= diámetro de un círculo cuyo equivalente a la superficie de la cuenca, en Km;

M= área de la cuenca, en km^2;

F= Porcentaje promedio de pendiente de las principales vías de desagüe de la cuenca.

Fórmula de Kirpich, expresada como:

$$Tc = 0.02 \times L^{0.77} \times S^{-0.385}$$

donde:

Tc= Tiempo de concentración, en minutos;

L= longitud máxima de la cuenca, en m;

S= gradiente promedio, en m/m.

Una vez estimado el Tc se define, una duración de lluvia esperada, para un período de recurrencia determinado, que se mantenga por un período igual al tiempo de concentración y que por lo tanto produzca la máxima intensidad de precipitación en la cuenca estudiada. Para cuencas con pendientes menores al 2 % en la Pampa Ondulada, Castiglioni et al. (1998) sostienen que este método subestima el Tc, por lo que no recomiendan su uso para estas condiciones.

Por período de recurrencia se entiende, a la probabilidad de que en un determinado lapso de tiempo (5, 10, 15, 50 años), pueda repetirse una lluvia máxima esperada. Dicho período se considera como límite, para que una vez pasado, se haga precisa una eventual reparación de los daños sufridos. Mientras mayor es el período elegido, mayor es la probabilidad que se produzcan eventos de mayor intensidad.

La elección del período de recurrencia adecuado esta relacionada con el costo de las prácticas y/o estructuras de protección y con el tiempo que permita que dicho costo quede amortizado.

Para la mayoría de las estructuras adoptadas para controlar o evitar la erosión, dicho período va a depender también, del tipo de proceso formador de la lluvia predominante del área. Para el centro sur de Córdoba, los procesos son dos:

- Frontales (poco intensas y se producen durante todo el año)
- Autoconvección por excitación orográfica (tormentas chubascosas, de alta intensidad, acompañadas con granizo y vientos; de ocurrencia exclusivamente estival).

En general, en áreas donde existe el primer proceso, el período óptimo es entre 5 y 10 años; mientras que donde el segundo proceso es el predominante, el período

de recurrencia óptimo es entre 10 a 20 años de acuerdo a las características de la situación en estudio.

En forma general y a modo de síntesis, al definir los períodos más adecuados para una situación particular, se debe tener presente lo siguiente:

- Variación climática (alternancias de períodos húmedos y secos medidos en décadas);
- Avances tecnológicos (que determinen la adecuación de nuevas técnicas para la solución de los problemas erosivos);
- Cambios en los procesos de producción, originados por factores: económicos (nuevos mercados, precios), tecnológicos (aparición de nuevas especies);
- Costos de ejecución y mantenimiento de las obras de infraestructura.
- Envergadura o importancia social de la obra a construir: este aspecto hace referencia a un factor seguridad en el éxito de la obra para un período de tiempo determinado (un puente será planteado para un período de recurrencia en el orden de los cientos de años; un alero de chapas para el control de cabecera de cárcava, en el orden de una década).

El cálculo de la intensidad de precipitación para aplicar en la fórmula de Ramser, puede realizarse de las siguientes formas:

- contar con información pluviográfica local;
- estimar I a partir de valores medios de intensidades para el lugar;
- estimar I a partir de datos de precipitación máxima de 24 horas, previo tratamiento estadístico adecuado.

Si bien lo ideal es contar con información de pluviógrafos para la zona estudiada, lo cual permitiría un cálculo más preciso de la intensidad correspondiente al tiempo de concentración, por lo general resulta difícil contar con esa información, por lo que I se puede estimar a partir de una lluvia máxima de 24 horas (es un dato más fácil de obtener) y mediante el empleo de coeficientes de conversión, se determina una lluvia máxima en 30 min, 1 hora, 2 horas, etc., para un período de recurrencia de 10 años, como se muestra en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: Factor de conversión para estimar intensidades de lluvia a partir de una lluvia máxima de 24 horas.

Duración de lluvia	**30 min.**	**1 hora**	**2 horas**	**6 horas**	**12 horas**	**24 horas**
Factor de conversión	0,31	0,36	0,44	0,69	0,88	1,00

Una vez determinado el Tc de la cuenca y el valor de intensidad horaria de lluvia, se deberá corregir este valor para el Tc determinado. La corrección puede realizarse empleando métodos gráficos tales como el de la Figura 2.10. En este se lee en ordenadas la intensidad horaria elegida y se intercepta en el diagrama la curva correspondiente al Tc calculado. En abscisas se lee la intensidad de lluvia corregida para dicho Tc.

Otro método gráfico (Schwab *et al.*, 1990), permite obtener el factor de corrección en la ordenada, a partir del dato de tiempo de concentración (Tc), que se localiza en la abscisa (Figura 2.11). Conocido el factor de corrección, se lo multiplica por la intensidad horaria sin corregir.

Una forma de obtener intensidad horaria corregida según el Tc, es a partir de una serie estadística de precipitaciones para diferentes períodos de recurrencia, de la que se obtiene la lluvia neta (mm) en un tiempo de duración determinado (min). El procedimiento es muy sencillo, ya que se busca una duración de lluvia igual al tiempo de concentración (Tc) y se calcula la intensidad horaria (mm/h) (Tabla 2.7).

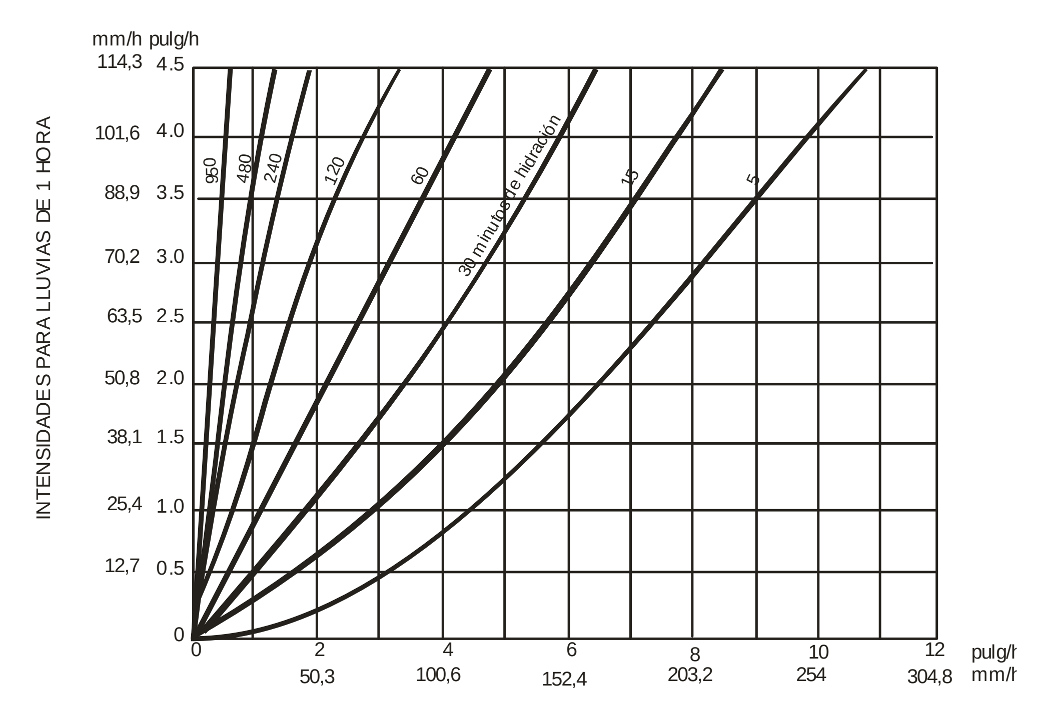


Figura 2.10: Método gráfico para la obtención de la Intensidad horaria corregida según el Tc.

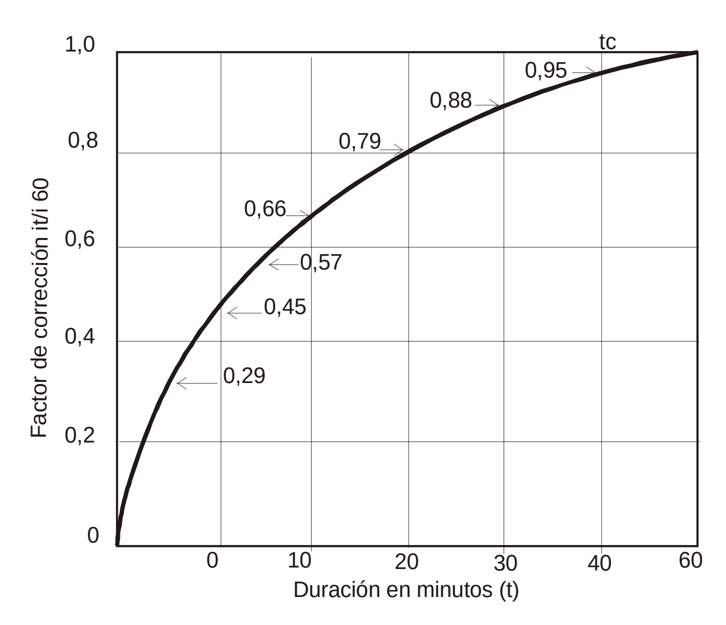


Figura 2.11: Factor de corrección para calcular la intensidad de lluvia (Schwab *et al*., 1990).

Tabla 2.7: Serie de precipitaciones según diferentes períodos de recurrencia para la zona de influencia de la UNRC (centro sur de Córdoba).

Lluvia neta (mm)				
Período de recurrencia				
Tiempo de duración (min)	**5 años**	**10 años**	**20 años**	**50 años**
5	10	12	15	17
15	25	30	40	45
30	45	50	65	85
60	80	85	100	120
120	120	130	150	170

Área de la cuenca (A)

El factor que resta para el cálculo del caudal pico es la superficie de la cuenca expresada en hectáreas. La estimación de este dato se realiza a través del uso de un planímetro o por el método de la cuadrícula, el cual consiste en el recuento de cuadros de un área conocida, que entran en el perímetro de la cuenca.

Ejemplo de estimación del caudal pico:

Datos:

-Superficie de la cuenca = 300 ha
-Pendiente general de la cuenca = 1 %
-Distancia mayor a recorrer por el escurrimiento superficial = 1.220 m
-Suelos con baja velocidad de infiltración y moderado escurrimiento: "grupo hidrológico C"
-Cultivos realizados:

- *trigo (con prácticas mejoradas), 120 ha*
- *maíz (con prácticas mejoradas), 80 ha*
- *pastura permanente, 100 ha*

-Intensidad máxima de lluvia: 60 mm/hora, para un período de recurrencia de 10 años.

Solución:

- Cálculo del Tiempo de concentración (Tc):

$$Tc = 0.02 \times L^{0.77} \times S^{-0.385}$$

$$Tc = 0.02 \times 1220^{0.77} \times 0.01^{-0.385} = 27\ minutos$$

- Corrección de la intensidad de la lluvia: puede realizarse según los siguientes métodos:

- *Figura 2.10: para 60 mm/h y un Tc= 27 min, se obtiene una intensidad corregida de 100 mm/h*
- *Figura 2.11: para un Tc= 27 min, el factor de corrección es 0,75. La intensidad corregida es:*

$$60\ \frac{mm}{h} \times 0.75 \times \frac{60\ min}{27\ min} = 100\ \frac{mm}{h}$$

Se recuerda que se debe multiplicar por la relación 60 min/27 min para expresar el resultado como intensidad horaria

- *Serie estadística de precipitaciones: con el Tc= 27 min calculado se debe hacer una interpolación lineal para encontrar una lluvia que dure el Tc. En este caso es necesario realizarla entre las duraciones de 15 y 30 minutos con sus respectivas precipitaciones.*

Entonces, para un período de recurrencia de 10 años, la lluvia caída en un tiempo de 27 minutos, es:

Tiempo de duración (min)	**Lluvia neta PR =10 años**
15	30
27 Tc calculado	**¿?**
30	50

Para 15 min de tiempo de duración, se tiene una diferencia de lluvia neta de 20 mm, entonces los 3 min de diferencia entre los 30 min y los 27 min de Tc, arrojan una lluvia neta de 4 mm: Por lo tanto, la lluvia neta para los 27 min del Tc calculado, surge de restar 50 mm menos 4 mm, siendo el resultado 46 mm.

Para expresarlo en intensidad horaria, se realiza una regla de tres simple, dando como resultado una intensidad de 102,2 mm/h

- Cálculo del coeficiente "C": se efectúa por el método gráfico (Schawb et al., 1990) aunque, de acuerdo a la información disponible, pueden usarse las tablas de otros autores.

El cálculo del coeficiente de escurrimiento "C", se realiza para suelos del grupo hidrológico "C" y para una intensidad de lluvia calculada de 100 mm/h.

- *Para el cultivo de trigo con prácticas mejoradas, C = 0,23*
- *Para el cultivo de maíz con prácticas mejoradas, C = 0,62*
- *Para una pradera permanente, C = 0,19*

El valor final se obtiene realizando un promedio ponderado por la superficie que ocupa cada cultivo:

$$C = \frac{120\ ha}{300\ ha} \times 0.23 + \frac{80\ ha}{300\ ha} \times 0.62 + \frac{100\ ha}{300\ ha} \times 0.19 = 0.32$$

- Estimación del caudal máximo de escurrimiento, Qp:

$$Qp = \frac{C \times I \times A}{360} = \frac{0.32 \times 100 \times 300}{360} = 26.7\ \frac{m^3}{s}$$

Tanto el Qp, como el Tc permiten graficar el hidrograma triangular de una crecida, solo falta calcular el tiempo de recesión. El Soil Conservation Service sugiere que el tiempo de recesión puede aproximarse como 1.67Tc. (Figura 2.12).

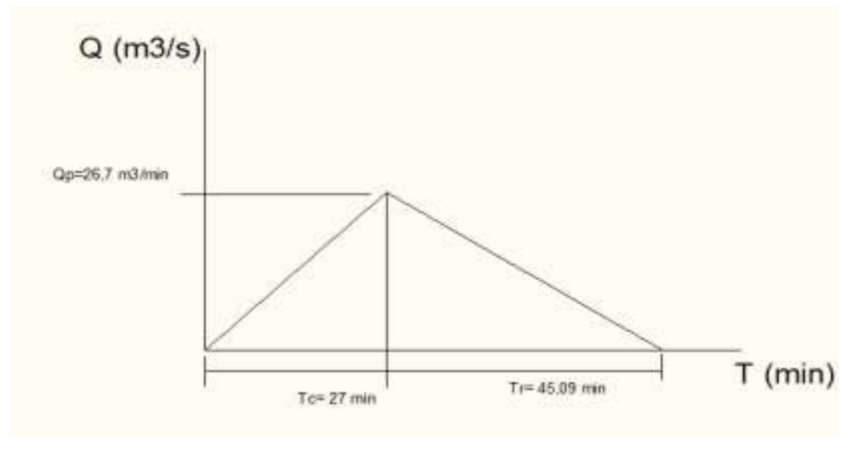


Figura 2.12: Hidrograma triangular del ejemplo de cálculo de Qp por el método racional.

2.2.2. Método del Servicio de Conservación de Suelos del USDA (Curva Número)

Es un método adecuado para la estimación del escurrimiento en cuencas reducidas (hasta 800 ha aproximadamente). Una de las ventajas en relación a otros métodos consiste en que, además de tomar en cuenta la influencia de las características de la cuenca (relieve, infiltración, cobertura vegetal, etc.) en la estimación del caudal pico, considera los efectos de las prácticas conservacionistas.

Además, es importante consignar que este método, a diferencia de la Fórmula Racional, emplea para la estimación de los escurrimientos, la lluvia total máxima de 24 horas y no la intensidad horaria.

Se lo utiliza para estimar el volumen medio de escurrimiento de una cuenca y además el caudal pico. La diferencia entre ambos parámetros hidrológicos es básica:

- el volumen escurrido indica la cantidad total de escurrimiento que produce una cuenca expresada en forma de lámina unitaria (mm) o en volumen total (m^3, hm^3). En una cuenca el volumen total escurrido (m^3) surge del producto de la lámina (m) por el área de la cuenca (m^2). Representa el área total bajo un hidrograma (Figura 2.12).
- el caudal pico, tal como se discutió en el apartado 2.2.a., expresa la cantidad de escurrimiento instantáneo para una creciente máxima, que ocurre en una unidad de tiempo, expresada en l/s o m^3/s, representada por el máximo caudal (Figura 2.12).

El método se basa en determinar los grupos hidrológicos de suelos que componen la cuenca, el uso de los mismos y la posible aplicación de prácticas conservacionistas. Con estos elementos se integra el complejo hidrológico suelo-cobertura o Curva Número (CN).

Componentes básicos del método de la Curva Número

Grupo Hidrológico de Suelo

Las propiedades físicas del suelo tienen influencia importante en la generación del escurrimiento superficial: se las debe reunir en un parámetro hidrológico. Este parámetro es el Grupo Hidrológico de Suelo y se refiere al grado mínimo de infiltración obtenido en un suelo desnudo, después de una prolongada mojadura.

Para definirlo se consideran las condiciones de superficie y las de los horizontes. En el primer caso se habla del grado de infiltración y en el segundo, del grado de transmisión.

El grado de infiltración se refiere a la velocidad con que el agua penetra en el suelo desde la superficie y depende de las condiciones superficiales.

El grado de transmisión es la velocidad de movimiento del agua en el perfil y depende de la permeabilidad de los distintos horizontes.

Los grupos hidrológicos son cuatro: A, B, C y D, yendo desde los que poseen un alto grado de infiltración y transmisión (potencial bajo de escurrimiento), hasta los que tienen muy bajo grado de entrada de agua al perfil (potencial alto de escurrimiento). En la Tabla 2.8 se muestran las características generales de los perfiles de suelos, correspondientes a cada grupo hidrológico.

Tabla 2.8: Grupos hidrológicos de suelos y características generales de los perfiles que los definen.

Grupo hidrológico	Grados de infiltración-transmisión	Características Generales del perfil
A	ALTO (potencial bajo de escurrimiento)	Suelos profundos, bien o excesivamente drenados; texturas arenosas, gravas, gravillas, etc.
B	MODERADO	Suelos moderadamente profundos, sin barreras físicas importantes, materiales más finos que arenas.
C	BAJO	Presencia de capas u horizontes que limitan la infiltración y transmisión del agua; texturas más finas.
D	MUY BAJO (potencial alto de escurrimiento)	Suelos someros o con capa densificada e impermeable cercana a la superficie; texturas arcillosas con predominio de arcillas expandibles.

Resulta conveniente determinar la distribución areal de los grupos hidrológicos dentro de una cuenca. Para ello, lo más adecuado es contar con un mapa de suelos a escala conveniente y la descripción de los perfiles. La resultante será una curva número ponderada según el grupo hidrológico de suelo (su cálculo se verá más adelante).

Si un suelo no está bien definido en un grupo hidrológico, se pueden crear subgrupos interpolando las Curvas Número.

Uso y Manejo de los Suelos

El uso del suelo se refiere al estado y tipo de cobertura que tienen los suelos de la cuenca, incluyendo los distintos tipos de vegetación (cultivos, pasturas y bosques), barbechos y usos no agrícolas del suelo (lagunas, caminos, entre otros).

El manejo o tratamiento del suelo se refiere fundamentalmente a la forma de realizar las labranzas: en surcos rectos a favor de la pendiente o en contorno (siguiendo curvas de nivel). El cultivo en contorno puede ser a su vez, con o sin terrazas.

Los principales usos que se consideran son:

- Barbecho: es el uso con el mayor potencial de escurrimiento, ya que se refiere al barbecho desnudo. El barbecho bajo cubierta de rastrojos no se considera, pero se podría evaluar por comparación de sus condiciones de campo con aquellas clases que figuran en las tablas.
- Cultivos de grano grueso: se refiere a cultivos efectuados en surcos lo suficientemente separados como para que el suelo quede expuesto al impacto de las gotas de lluvia durante la estación de crecimiento. En el momento de la siembra al cultivo se lo considera un barbecho, al igual que después de la cosecha. La mayoría de los aspectos evaluados se suponen para condiciones generales y promedio.
- Cultivos de grano fino: se siembran en surcos cercanos entre sí (cultivos densos como los de cereales de invierno), de manera que protegen bien el suelo, salvo en un corto período inicial.

- Leguminosas de siembra densa o rotaciones de cultivos y pasturas: se refiere a leguminosas sembradas al voleo para proteger el suelo durante todo el año y a rotaciones de cultivos entre sí o a rotaciones de cultivos con pasturas. Se habla de rotación "pobre", cuando se efectúa sobre la base de uno o dos cultivos agrícolas, sin pasturas. Se considera de "buena rotación", cuando se incluyen pasturas para mejorar la infiltración de los suelos.
- Pasturas naturales: se evalúa la efectividad de cobertura que brindan al suelo, estableciendo tres condiciones hidrológicas: "pobre", cuando cubren menos del 50% del área, "regular", cuando cubren entre el 50-75% y "buena", cuando cubren más del 75% del área.
- Bosques: se refiere, fundamentalmente, a bosquecillos de árboles cultivados en las chacras. La condición hidrológica se evalúa en función de la cobertura que brindan.

Los manejos o tratamientos considerados son:

- Cultivos en contorno: se refiere a campos trabajados siguiendo las curvas de nivel o una línea semejante. El efecto hidrológico del contorno se debe a una mayor retención y detención del agua en la superficie del suelo, al entorpecer el desplazamiento del agua, dándole más tiempo para infiltrar. La magnitud de este almacenamiento superficial dependerá de las dimensiones del surco, labores culturales, pendiente del terreno, tipo de cultivo, sistemas de cultivos y por supuesto, del suelo considerado. En general, en cultivos densos, los surcos se destruyen durante la estación de crecimiento por acción climática. En los cultivos de escarda, en cambio, éstos se mantienen por las carpidas sucesivas. Los valores consignados en tabla, se refieren a condiciones promedio para la estación de crecimiento.
- Cultivos en surcos rectos: se refiere a campos cultivados a favor de la pendiente. Cuando se efectúan en surcos rectos pero cortando la pendiente, se lo puede considerar como cultivos en contorno.
- Cultivos en terrazas: se refiere a sistemas de cultivo realizados en contorno con terrazas que pueden construirse a nivel o con un cierto gradiente de pendiente (a desnivel). El efecto hidrológico de esta práctica es también aumentar la retención y detención superficial del agua y conducir excedentes en forma no erosiva, para el caso de las terrazas con desnivel.

Complejos Hidrológicos Suelo-Cobertura, CN

Cuando se combina un grupo hidrológico de suelo, con el uso y manejo que se le da al mismo, se constituye un Complejo Hidrológico Suelo-Cobertura.

Cada complejo hidrológico está representado por una relación o Curva Número (CN) de escurrimiento. Las curvas número indican el escurrimiento potencial de un complejo: a mayor curva número, mayor escurrimiento potencial. Los valores de CN consignados en la Tabla 2.9 son promedios de casos estudiados en cuencas experimentales.

Tabla 2.9: Valores de CN para los diferentes grupos hidrológicos, usos y manejos de la tierra (condición de humedad antecedente, AMC II).

			Clase hidrológica			
Uso	**Manejo**	**Estado**	**A**	**B**	**C**	**D**
Barbecho	surcos rectos	malo	77	86	91	94
Cultivos en surcos	surcos rectos	malo	72	81	88	91
	surcos rectos	bueno	67	78	85	89
	curvas de nivel	malo	70	79	84	88
	curvas de nivel y bancales	malo	66	74	80	82
	curvas de nivel y bancales	bueno	62	71	78	81
Cereales finos	surcos rectos	malo	65	76	84	88
	surcos rectos	bueno	63	75	83	87
	curvas de nivel	malo	63	74	82	85
	curvas de nivel	bueno	61	73	81	84
	curvas de nivel y bancales	malo	61	72	79	82
	curvas de nivel y bancales	bueno	59	70	78	81
Leguminosas de siembra densa o praderas en rotación	surcos rectos	malo	66	77	85	89
	surcos rectos	bueno	58	72	81	85
	curvas de nivel	malo	64	75	83	85
	curvas de nivel	bueno	55	69	78	83
	curvas de nivel y bancales	malo	63	73	80	83
	curvas d nivel y bancales	bueno	51	67	76	80
Pastos o pastizales		malo	68	79	86	89
		regular	49	69	79	84
		bueno	39	61	74	80
	curvas de nivel	malo	47	67	81	88
	curvas de nivel	regular	25	59	75	83
	curvas de nivel	bueno	6	35	70	79
Prado (permanente)		bueno	30	58	71	78
Bosques		malo	45	66	77	82
		regular	36	60	73	79
		bueno	25	55	70	77
Vegas de ríos		Bueno	30	58	71	78
Áreas abiertas, césped, parques, campo de golf, etc		Condiciones óptimas (75% de cubierta)	39	61	74	80
		Condiciones aceptables (50% - 75%)	49	69	79	84
Áreas comerciales		85% impermeables	89	92	94	95
Residencial						
500 m2 lote		65% impermeables	77	85	90	92
1000 m2 lote		38% impermeables	61	75	83	87
1500 m2 lote		30% impermeables	57	72	81	86
2000 m2 lote		25% impermeables	54	70	80	85
4000 m2 lote		20% impermeables	51	68	79	84

Condición de humedad del suelo

El contenido de humedad del suelo tiene influencia sobre la velocidad de infiltración y posibilidad de almacenaje de agua de lluvia y por lo tanto sobre el volumen de escurrimiento que se genera. De ahí que se considere el total de lluvias registradas en los cinco días anteriores a la lluvia que se utilizará para estimar el escurrimiento. Ello determinará la Condición de Humedad Antecedente (Antecedent Moisture Condition, AMC).

A tal efecto, se emplean tres niveles de AMC:

- AMC I: corresponde a la condición de suelo seco, y por lo tanto a la situación de escurrimiento potencial más bajo.

- AMC II: corresponde a una situación promedio de humedad.
- AMC III: corresponde a la condición de suelo prácticamente saturado por las últimas lluvias y por lo tanto a la situación de mayor escurrimiento potencial.

Los cálculos de escurrimiento se realizan siempre sobre la base de una AMC media, o sea para AMC II y cuando sea necesario se podrán corregir a AMC I o AMC III. Para la conversión entre diferentes AMC se emplea la Tabla 2.11, en la cual se representa la precipitación acumulada durante los cinco días anteriores a la lluvia considerada para estimar el escurrimiento teniendo en cuenta si la vegetación se encuentra en estado de crecimiento o de reposo.

Por ejemplo: se desea conocer la AMC para las máximas precipitaciones del mes de marzo de una determinada localidad, sobre una serie de datos de 30 años.

Para cada lluvia máxima del mes de marzo de cada año, se determina la lluvia de los cinco días anteriores y por medio de la Tabla 2.10., la correspondiente AMC. Luego con estos datos, se calcula el porcentaje de casos de ocurrencia de lluvias con AMC I, AMC II y AMC III. Así por ejemplo, surge de los 30 años considerados, que las lluvias máximas de marzo suceden en un 50% sobre AMC III, en un 30% sobre AMC II y en un 20% sobre AMC I.

De acuerdo con esta situación se deberá realizar la corrección de la CN seleccionada, empleando a tal efecto la Tabla 2.11, ya que los valores de CN que constan en la Tabla 2.9, se refieren a la condición de AMC II.

Tabla 2.10: Total de precipitación acumulada en los cinco días anteriores a la lluvia considerada para el cálculo del escurrimiento (USDA, 1972).

Grupos de AMC	**Total de precipitación acumulada en los cinco días anteriores (mm)**	
	Estación de reposo de la vegetación	Estación de crecimiento de la vegetación
AMC I	menos de 12,7	menos de 35,6
AMC II	entre 12,7 y 27,9	entre 35,6 y 53,3
AMC III	más de 27,9	más de 53,3

Tabla 2.11: Números de CN para las diferentes condiciones de humedad y valores de S (máxima retención potencial de agua por el terreno, USDA, 1972).

	CN				**CN**		
CN para la condición AMC II	**AMC I**	**AMC III**	**S(mm)**	**CN para la condición AMC II**	**AMC I**	**AMC III**	**S(mm)**
100	100	100	0,0	58	38	76	181,0
98	94	99	5,1	56	36	75	196,5
96	89	99	10,4	54	34	73	213,0
94	85	98	15,3	52	32	71	230,7
92	81	97	21,7	50	31	70	250,0
90	78	96	27,7	48	29	68	270,0
88	75	95	34,0	46	27	66	292,5
86	72	94	40,7	44	25	64	317,5
84	68	93	47,5	42	24	62	345,0
82	66	92	55,0	40	22	60	375,0
80	63	91	62,5	38	21	58	407,5
78	60	90	70,5	36	19	56	445,0
76	58	89	79,0	34	18	54	485,0
74	55	88	87,7	32	16	52	530,0
72	53	86	97,2	30	15	50	582,5
70	51	85	107,0	25	12	43	750,0
68	48	84	117,5	20	9	37	1000,0
66	46	82	128,7	15	6	30	1417,5
64	44	81	140,5	10	4	22	2250,0
62	42	79	153,2	5	2	13	4750,0
60	40	78	166,7	0	0	0	infinito

Aplicación del método CN para estimación del volumen de escurrimiento

El método CN estima el volumen de escurrimiento a través de la siguiente formula:

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia) + S}$$

donde:

Q = volumen escurrido, en mm;

P = precipitación acumulada, en mm;

Ia = retención inicial o abstracción inicial: incluye la retención superficial, interceptación por la vegetación e infiltración en el terreno, previa a la producción del escurrimiento, en mm;

S = máxima retención potencial de agua por el terreno (incluye la Ia), en mm.

El método asume que:

$$Ia = 0.2 \times S$$

es decir que, la retención o abstracción inicial es el 20% de la capacidad de retención total. El 80% restante corresponde a la infiltración después que el escurrimiento ha comenzado.

La fórmula para la estimación de la lámina escurrida Q, reemplazando, es la siguiente:

$$Q = \frac{(P - 0.2 \times S)^2}{(P - 0.2 \times S) + S}$$

El parámetro S puede tomar valores entre cero e infinito: cuando valga cero, el escurrimiento será máximo, tratándose de una superficie lisa e impermeable. Será infinito en un suelo extremadamente permeable. La relación de S con la curva número (CN) es la siguiente:

$$S = \left(\frac{25400}{CN} - 254\right)$$

donde, si S=0, la CN=100, que es el máximo valor que puede aparecer en los gráficos de CN. Vale decir que, la CN es una relación que está en función de la máxima retención potencial, e indica el escurrimiento potencial de un complejo.

Ejemplo de aplicación de la metodología para el cálculo del volumen de escurrimiento.

Se desea conocer el volumen o lámina de escorrentía generado en una cuenca de 300 ha, con suelos Argiudoles típicos, con una pendiente media y uniforme de 1,5%, con los siguientes cultivos:

a) 180 ha de trigo a favor de la pendiente;

b) 120 ha de pasturas de leguminosas.

La época considerada para la estimación es el mes de septiembre, la humedad antecedente corresponde a AMC I (suelo seco), la precipitación máxima considerada es de 100 mm en 24 horas.

c) Longitud de la Cuenca = 1500 m.

Solución:

1. *Se establece el grupo hidrológico al cual corresponde la situación. Por las características de los suelos, la situación corresponde al Grupo Hidrológico C.*
2. *En el cuadro 8 (AMC II) se obtiene el valor de CN para:*

   a) trigo a favor de la pendiente, grupo hidrológico de suelo C, CN=83;

   b) pastura de alfalfa, grupo hidrológico de suelo C, CN=81.
3. *A través del cuadro 9 se corrige el valor de CN para la AMC real del suelo, que en este caso es AMC I.*
4. *Se calcula la CN media ponderada para la cuenca. Se realiza del siguiente modo:*

   180 ha de trigo representan el 60% de la superficie de la cuenca;

   120 ha de pasturas representan el 40% de la superficie de la cuenca;

   La CN media será la siguiente:

% de la superficie	***CN***	***CN PONDERADA***
60	*67*	*40,2*
40	*64*	*25,6*
		65,6 = 66

5. *Sobre la base de la CN=66, la precipitación de 100 mm que es equivalente a 4´´, se utiliza la Figura 2.13 para obtener el volumen de escurrimiento.*

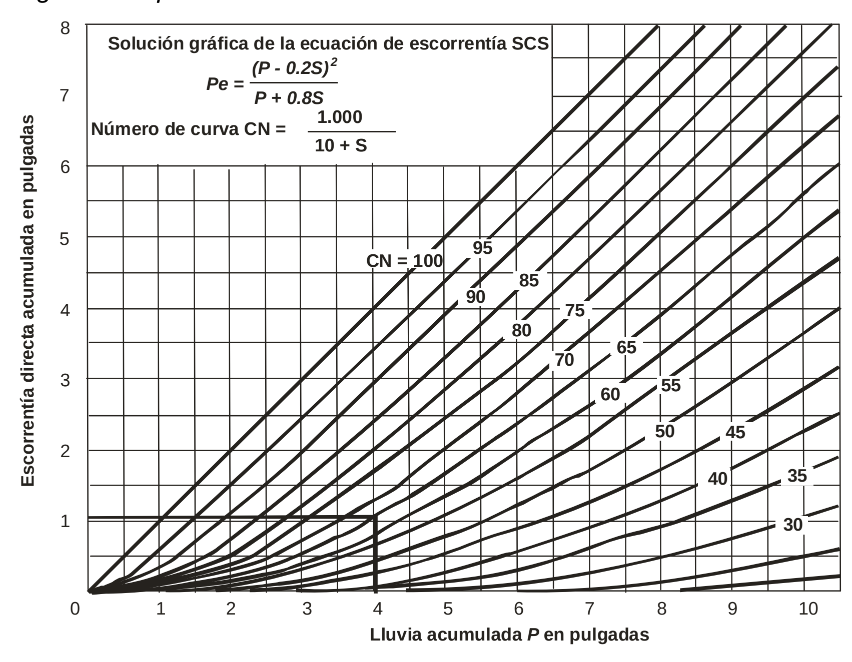


Figura 2.13: Nomograma para determinar la escorrentía (USDA, 1972)

6. *El resultado indica un escurrimiento de 1,05 pulgadas aproximadamente, lo que representa 27 mm de lámina escurrida.*

Aplicación del método CN para estimar caudales pico

El método CN ha sido ampliamente utilizado para estimar las tasas máximas de escorrentía de pequeñas cuencas rurales y urbanas. El método de estimación de tasa de escurrimiento pico es aplicable a cuencas de hasta 900 ha y con pendientes mayores que 0,5 %, con un canal principal o dos tributarios con casi el mismo tiempo de la concentración.

El caudal pico se obtiene según la siguiente expresión:

$$Qp = Qpu \times A \times Q \times Fp$$

Dónde:

Qp = Caudal pico (m^3/s);
Qpu= Caudal pico unitario (m^3/s por ha por mm de lluvia) x 10^{-3}
A = Área de la cuenca (ha)
Q = Volumen escurrido (mm)
Fp= Factor de ajuste por presencia de lagunas.

Al igual que en el método de Ramser, se necesita estimar el tiempo de concentración de la cuenca, el mismo puede estimarse mediante la siguiente ecuación (Schwab *et al.*1990).

$$Tc = L^{0.8} \times \left[\frac{\left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{4407 \times S_g{}^{0.5}} \right]$$

Donde:

Tc = Tiempo de concentración (h)
L = Longitud de la cuenca (m)
CN = Curva Número
S_{g} = Pendiente (m/m)

Además de la estimación del *Tc,* es necesario estimar la abstracción inicial, *Ia*, discutida en el apartado anterior, según:

$$Ia = 0.2 \times S$$

y donde S es igual a:

$$S = \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right)$$

La obtención del caudal pico unitario se basa en un método gráfico, que incluye la relación entre *Ia* y la lluvia en 24 hs. El valor de Qpu se obtiene por interpolación de la Figura 2.14.

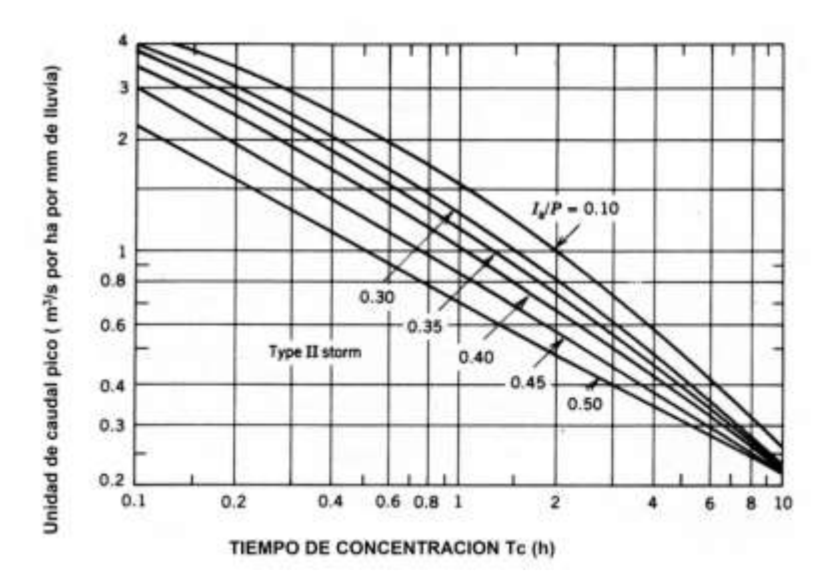


Figura 2.14: Nomograma para determinar el caudal pico en función de la abstracción inicial y las precipitaciones

El factor de ajuste por lagunas y pantanos, Fp, tiene en cuenta el efecto amortiguador de las crecientes que tienen los cuerpos de agua. Si no hay lagunas en la cuenca el Fp es 1. El resto de los valores de Fp se indican en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12: Factor de ajuste Fp para cuencas con presencia de lagunas y pantanos.

Porcentaje de laguna y pantanos	F_p
0	1,0
0,2	0,97
1,0	0,87
3,0	0,75
5,0	0,72

Con el valor de Qpu obtenido de la Figura 2.14, con el área de la cuenca, la lámina escurrida obtenida por el procedimiento discutido en el apartado b.2 , y el Fp se está en condiciones de estimar el Qp de la cuenca. Se discute en el siguiente ejemplo.

Ejemplo de aplicación de la metodología para el cálculo del caudal pico

Con los datos de ejemplo anterior se estima el caudal pico (m^3/s ó pie^3/s) por el método SCS-TR55 del USDA (1986).

1. *Estimación del Tc:*

$$Tc = L^{0.8} \times \left[\frac{\left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{4407 \times S_g^{\ 0.5}} \right]$$

donde CN = 65
Sg = 0,015 m/m
L = 1500 m
Operando, Tc = 0,36 h

2. *Luego se estima S y la relación Ia/P*

$$S = \left(\frac{25400}{CN} - 254\right)$$

Siendo S = 136,7 mm
Ia = 0,2 x 136,7 = 27,4 mm
entonces la relación Ia/P es igual 0,27

3. *Con el valor Ia/P y el Tc se ingresa a la Figura 2.14 y obtenemos Qpu, siendo igual a 2,4 x 10^{-3} m^3/s por ha por mm.*

4. *El Fp, se obtiene de la Tabla 2.12,*
En este ejemplo, no hay presencia de lagunas, por lo tanto F_p = 1

5. *Se calcula Q (volumen escurrido en mm)*

$$Q = \frac{(P - 0.2 \times S)^2}{(P - 0.2 \times S) + S}$$

$$Q = \frac{(100 - 0.2 \times 136.7)^2}{100 - 0.2 \times 136.7 + 136.7}$$

$$Q = 25.21\ mm$$

6. *Se calcula Qp remplazando en la ecuación:* $Qp = Qpu\ A\ Q\ Fp$

$$Qp = 0.0024 \times 300 \times 25.21 \times 1 = 18.15\ m^3/s$$

2.3. Modelos de simulación en Hidrología Superficial: El programa HEC-HMS 3.5

2.3.1. Introducción

El Sistema de Modelación Hidrológica HEC-HMS (Hydrologic Modeling System – Hydrologic Engineering Center) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EEUU, es un software libre, y está diseñado para simular los procesos de precipitación-escorrentía de los sistemas de cuencas dendríticas. Puede ser aplicado en un amplio rango de áreas geográficas para la solución de una amplia gama de problemas. Esto incluye el abastecimiento de agua e hidrología de inundaciones de una gran cuenca y la escorrentía de una pequeña cuenca urbana o natural. Los hidrogramas producidos por el programa se utilizan directamente o junto con otro software para los estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, la previsión de flujo, el impacto de la futura urbanización, el diseño de reservorios, la reducción de daños de las inundaciones y la operación de los sistemas, entre otros.

El programa es un sistema de modelización generalizada capaz de representar gran número de cuencas diferentes. Un modelo de la cuenca se construye mediante la separación del ciclo hidrológico en partes manejables y la definición de límites en torno a la cuenca de interés. Cualquier flujo de masa o energía en el ciclo se puede representar con un modelo matemático. En la mayoría de los casos, varias opciones de modelo están disponibles para la representación de cada flujo. Cada modelo matemático incluido en el programa es adecuado en diferentes ambientes y bajo diferentes condiciones.

El programa ofrece un entorno de trabajo totalmente integrado que incluye una base de datos, servicios de entrada de datos,motor de cálculo y herramientas de informes de resultados. Una interfaz gráfica permite la circulación fluida entre las diferentes partes del programa, introducir la información necesaria para una simulación, manejar los componentes de análisis hidrológico a través de módulos integrados y obtener respuestas gráficas o tabuladas de fácil comprensión e impresión.

La funcionalidad del programa y la apariencia son las mismas en todos los sistemas operativos utilizados.

El uso del programa requiere que el usuario haya caracterizado previamente la/las cuencas en estudio desde el punto de vista físico, tal como se describe en los anteriores capítulos de hidrología (definición de cuencas y subcuencas, pendientes, red de drenaje, precipitación máxima, CN, etc.). Una vez realizada dicha caracterización se puede aplicar el modelo HEC-HMS para la modelación hidrológica en función de los objetivos de estudio planteados.

El objetivo de este capítulo es presentar el programa HEC-HMS, explicar sus principales componentes y su funcionamiento a través de ejemplos, de modo de dotar al usuario de las habilidades básicas para operar con el programa. El programa completo en todas sus versiones, así como las bases conceptuales y métodos de la simulación y manuales de usuario pueden ser descargados desde el sitio http://www.hec.usace.army. mil/software/ hec-hms/

2.3.2. Interfaz de usuario

Al abrir el programa se presenta una pantalla que consiste en una barra de herramientas en la parte superior y cuatro paneles principales (Figura 2.15).

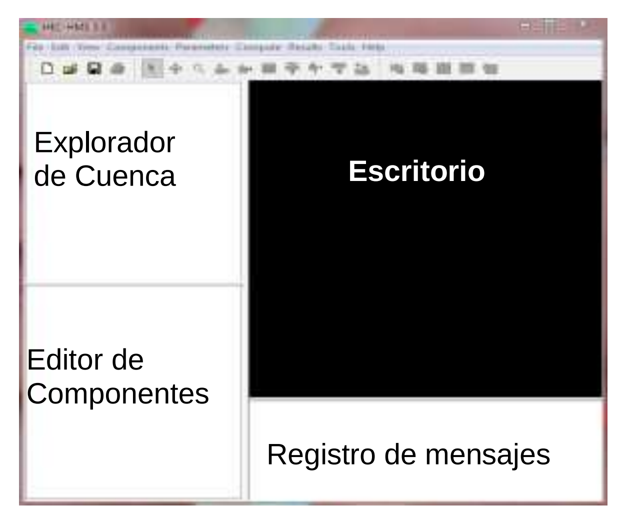


Figura 2.15: Pantalla principal de HEC-HMS 3.5 compuesta por: barra de herramientas en la parte superior, explorador de cuenca, editor de componentes, escritorio y registro de mensajes.

- Explorador de cuenca: Permite tener rápido acceso a todos los componentes del proyecto con el que se está trabajando, seleccionar corridas realizadas y consultar resultados.
- Editor de componentes: Muestra la información de cualquier elemento seleccionado en el explorador de cuenca y permite editar dichos elementos.
- Registro de mensajes: Aquí aparecen los mensajes, notas y avisos que envía el programa acerca de las tareas que se realizan en el proyecto.
- Escritorio: Es el lugar en el que el usuario esquematiza el mapa modelo de cuenca con todos sus componentes y donde se muestran todas las ventanas de los comandos que se van utilizando.

2.3.3. Desarrollo de un proyecto

En HEC-HMS se denomina proyecto al ensayo de simulación hidrológica de una cuenca. En él están involucrados todos los componentes necesarios para arribar con éxito a uno o varios ensayos de simulación sobre una determinada cuenca.

Configuración del programa

Para comenzar a trabajar es necesario configurar el programa según las necesidades del usuario. Configurar (ajustar o "setear") el programa significa definir el sistema de unidades de medida, las metodologías y los procedimientos de cálculo que el programa ejecutará para el proyecto definido. Para ello, en la barra de herramientas seleccionar *Tools* > *Program Settings* y se abrirá una nueva ventana con 5 solapas

(Figura 2.16) donde el usuario configura todo lo relacionado a formas de presentación de mensajes y resultados en pantalla, sistemas de unidades a utilizar y parámetros con los que se trabajará. En la solapa *Default* deberán seleccionarse los siguientes métodos de cálculo: *Unit System > Metric, Subbasin loss > SCS Curve Number, Subbasin transform > SCS Unit Hydrograph, Reach routing > Lag, Subbasin precipitation > Specified Hyetograph*. Es decir que para los ejemplos que se analizarán en esta obra se utilizarán unidades del sistema métrico, el método de la curva número del SCS-USDA para la transformación lluvia-escurrimiento de la/s cuencas, el/los hidrogramas de crecientes se desarrollará a partir del Hidrograma Unitario del SCS, para el traslado de las crecientes por los cursos se utiliza el método del tiempo lag, y la precipitación en las cuencas se define a través de un hietograma especificado por el usuario.

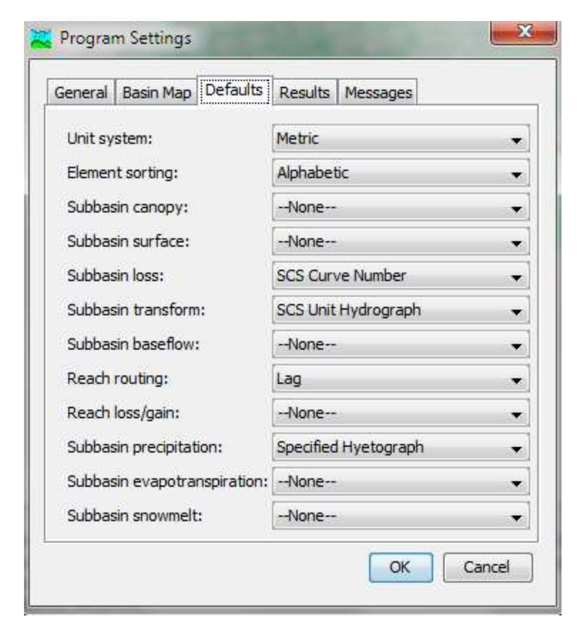


Figura 2.16: Ventana Program Settings de HEC-HMS 3.5 utilizada para configurar el programa.

Creación de un proyecto nuevo

El siguiente paso es crear un nuevo proyecto seleccionando *File>New*. A continuación se abrirá una ventana llamada *Create a New Project* en la que se debe escribir el nombre del proyecto que se desee utilizar, una descripción opcional del mismo, la ubicación donde quiere guardar y el sistema de unidades con que desea trabajar. Aparecerá en el explorador de cuenca una carpeta con el nombre que se haya escogido para el proyecto. Es conveniente elegir un nombre de proyecto que identifique claramente cada una de las cuencas a modelar y alguna otra característica que permita luego acceder con rapidez desde la base de datos de proyectos que crea HEC-HMS.

Todo proyecto está integrado por cinco componentes principales:

- Modelo de cuenca
- Modelo meteorológico
- Especificaciones de control
- Definición de datos en series de tiempo
- Definición de datos apareados

En el modelo de cuenca se incluyen todos los componentes físicos (cuencas, cursos, embalses, etc.) y funcionales (áreas, retardos, CN, etc.) del área a estudiar.

En el modelo meteorológico se define la lluvia de diseño para cada una de las cuencas. El modelo permite aplicar diferentes lluvias a cada una de las subcuencas definidas.

Las especificaciones de control definen el comienzo y fin de la simulación y el paso de tiempo de cálculo.

La principal definición de datos en series de tiempo del proyecto es el o los hietogramas de lluvias de diseño (mm de lluvia en cada intervalo de tiempo), para cada uno de los pluviómetros (precipitation gages) que se encuentren en la cuenca.

En la definición de datos apareados el usuario puede incluir relaciones o funciones esenciales para simular el funcionamiento de algunos tipos de estructuras específicas a incluir en el modelo de cuenca, tales como desviaciones (diversion) o embalses (reservoir). En el caso de los reservorios o embalses se deberán definir, por ejemplo, la relación entre altura del pelo de agua y volumen almacenado, o altura del pelo de agua y descarga por los vertederos.

A continuación se describe con detalle cada uno de los componentes del proyecto.

Creación del modelo de cuenca

Representación gráfica

El modelo de cuenca es la representación gráfica de la cuenca física. Para comenzar debe escogerse en la barra de herramientas *Components>Basin Model Manager* y luego *New.* Aquí debe seleccionarse el nombre que desea dársele al modelo y existe la opción de agregar una descripción. Aparecerá en el explorador de cuenca una carpeta denominada *BasinModels* conteniendo el nuevo modelo creado. Cabe aclarar que dentro de un mismo proyecto pueden crearse tantos modelos de cuenca como se requiera.

Para facilitar la creación del modelo de cuenca, antes de esquematizar la misma con los elementos propios de HEC-HMS, el programa permite mostrar en el escritorio imágenes, esquemas y mapas de los que disponga el usuario (Figura 2.17) a los fines de utilizarlos como plantilla sobre la cual trabajar. Para hacerlo, dirigirse a *View>Background maps* y seleccionar *Add*. Las extensiones admitidas son: *.dlg, *.shp, *.img, *.dxf, *.map, *.sid. Al poder trabajar con varias imágenes superpuestas al mismo tiempo, existe la posibilidad de mostrar, ocultar, cambiar el orden en la vista y realizar ediciones gráficas de las mismas según las necesidades. Todas estas opciones se encuentran también en *Background maps.*

Para la representación gráfica del modelo de cuenca se cuenta con siete herramientas básicas cuyos comandos se encuentran en la barra de herramientas (Figura 2.18):

- Subcuenca (Subbasin): Representa la subcuenca física. No recibe flujo de escorrentía entrante y produce sólo un flujo saliente, representado por un hidrograma de cuenca elemental.
- Cauce (Reach): Representa el elemento de conducción de la escorrentía de agua de una subcuenca o unión, hacia otra. Recibe uno o varios flujos entrantes y produce sólo un flujo saliente. La estructura de todos los cauces

integrados representa la red de drenaje del conjunto de subcuencas estudiadas.

- Unión (Junction): Representa la unión de elementos hidrológicos situados aguas arriba. Recibe uno o varios flujos entrantes y produce sólo un flujo saliente. Son los puntos en los que se producen sumas de hidrogramas.
- Sumidero (Sink): Representa la salida de la cuenca. Recibe uno o varios flujos entrantes y no produce flujo saliente. Representa el cierre de la cuenca o punto de interés para la simulación integrada del escurrimiento.
- Fuente (Source): Utilizado para introducir agua dentro de la cuenca. No recibe flujo entrante y el flujo saliente lo define el usuario. Ejemplo de fuente puede ser un trasvase de una cuenca a otra.
- Reservorio (Reservoir): Representa un microembalse o regulador de escurrimiento en sus variadas formas (regulador, reservorio, mixto, etc.). Recibe uno o varios flujos entrantes y produce sólo un flujo saliente. El programa simulará el flujo entrante y saliente de la obra.
- Derivación (Diversion): Representa un flujo de agua que abandona un tramo de cauce. Recibe uno o varios flujos entrantes y produce 2 flujos salientes, uno derivado definido por el usuario y otro no derivado que sigue por el cauce. Ejemplos típicos de derivación son las tomas para agua de riego.

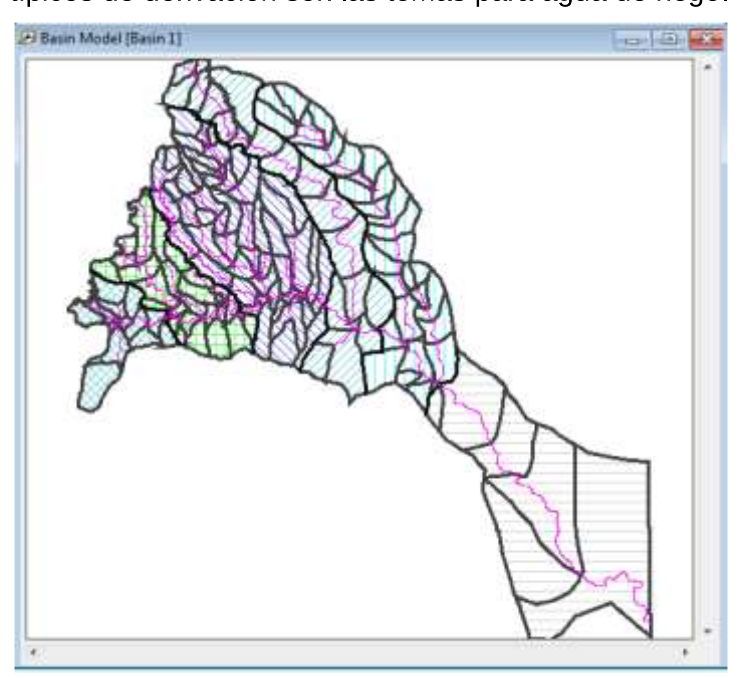


Figura 2.17: Escritorio de HEC-HMS 3.5 en el que se observan imágenes *.shp.

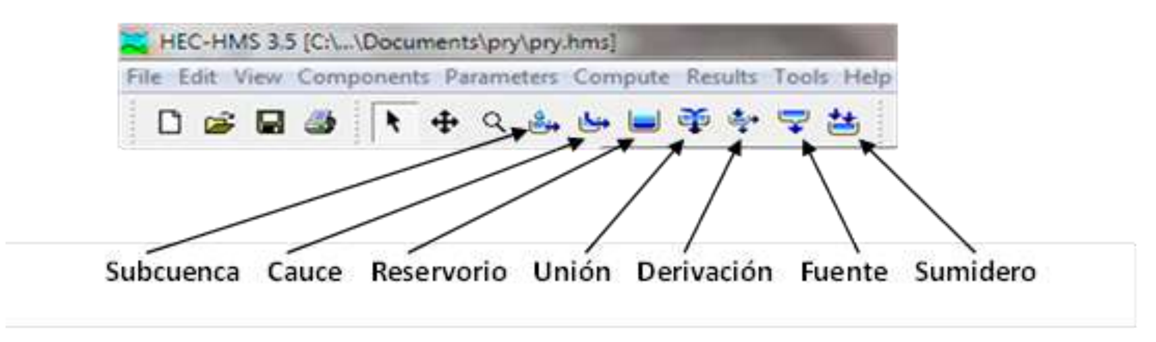


Figura 2.18: Comandos para la representación gráfica del modelo de cuenca en HEC-HMS 3.5

Para confeccionar el modelo se deben ir seleccionando uno por uno los elementos hidrológicos, ubicarse sobre el escritorio y hacer clic en el lugar donde se los pretende ubicar. A continuación aparecerá una ventana en la que se le dará el nombre a dicho elemento con la posibilidad de incluir una descripción. En el caso particular de los cauces, al tratarse de un elemento hidrológico que une dos puntos, debe dársele un punto de origen y otro de finalización haciendo clic en dichos lugares. Cada uno de los elementos que se vayan incluyendo en el modelo de cuenca se irán incorporando automáticamente en el explorador de cuenca (Figura 2.19).

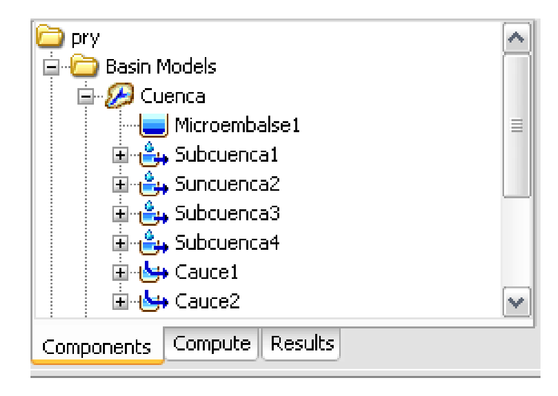


Figura 2.19: Explorador de cuenca de HEC-HMS 3.5 en el que se muestra un modelo de cuenca creado (denominado Cuenca) y sus componentes, dentro de un proyecto denominado pry.

Finalmente, una vez esquematizados todos los componentes del modelo es necesario conectarlos unos con otros desde aguas arriba hacia aguas abajo para indicarle al programa el funcionamiento hidrológico de dicho modelo. Para ello se debe escoger el ícono de selección en la barra de herramientas (representado por una flecha color negro), hacer clic derecho sobre cada elemento en el escritorio y se abrirá una ventana en la que se debe escoger *Connect Downstream* y posteriormente hacer clic sobre el componente próximo siguiente ubicado aguas abajo. Un modelo con los elementos conectados entre sí puede observarse en la Figura 2.20.

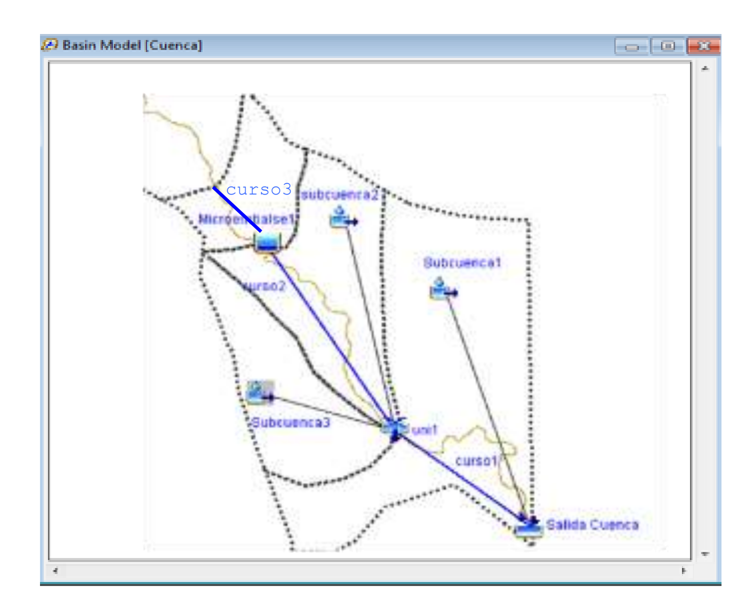


Figura 2.20: Modelo de cuenca esquematizado en el escritorio de HEC-HMS 3.5 utilizando imágenes *.shp (líneas punteada y marrón) como plantilla de fondo.

Ingreso de parámetros

Subcuencas

La información básica de cada subcuenca requerida para la simulación es: Área (km^2), Curva Número (CN), porcentaje de impermeabilidad del suelo, Abstracción Inicial (mm) y Tiempo Lag (min). Para completar esta información se puede proceder de dos maneras. Una forma es haciéndolo de a una subcuenca a la vez, seleccionando en el explorador de cuenca una determinada subcuenca y a continuación en el editor de componentes completar los datos requeridos en las solapas *Subbasin* (asignar el área), *Loss* (asignar CN, porcentaje de impermeabilidad y abstracción inicial) y *Transform* (asignar tiempo Lag) (Figura 2.21).

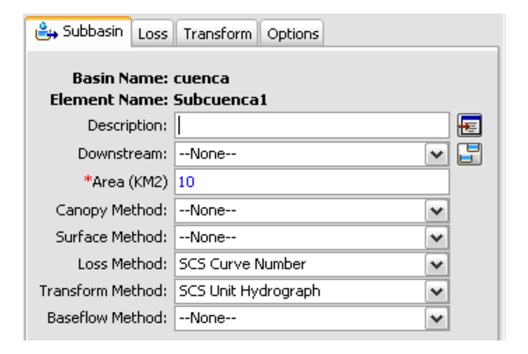


Figura 2.21: Editor de componentes de HEC-HMS 3.5 donde se muestran las solapas *Subbasin* para asignar el área de la subcuenca, *Loss* para asignar CN, abstracción inicial y porcentaje de impermeabilidad de la subcuenca y *Transform* para asignar tiempo Lag de la subcuenca.

La otra posibilidad es hacerlo para todas las subcuencas al mismo tiempo, seleccionando en el explorador de cuenca una determinada subcuenca y luego en la

barra de herramientas ir a *Parameters>Subbasin Area* para asignar el área, *Parameters>Loss>SCS Curve Number* para asignar CN, porcentaje de impermeabilidad y abstracción inicial y *Parametres>Transform>SCS Unit Hydrograph* para asignar el tiempo Lag. En cada uno de los tres casos se abrirá una ventana (Figura 2.22) en la que se debe seleccionar *Show Elements>All elements* para que se muestren todas las subcuencas y también se puede escoger como se desean visualizar las mismas, si ordenadas alfabética o hidrológicamente seleccionando *Sorting>Alfabetic / Hydrologic,* respectivamente.

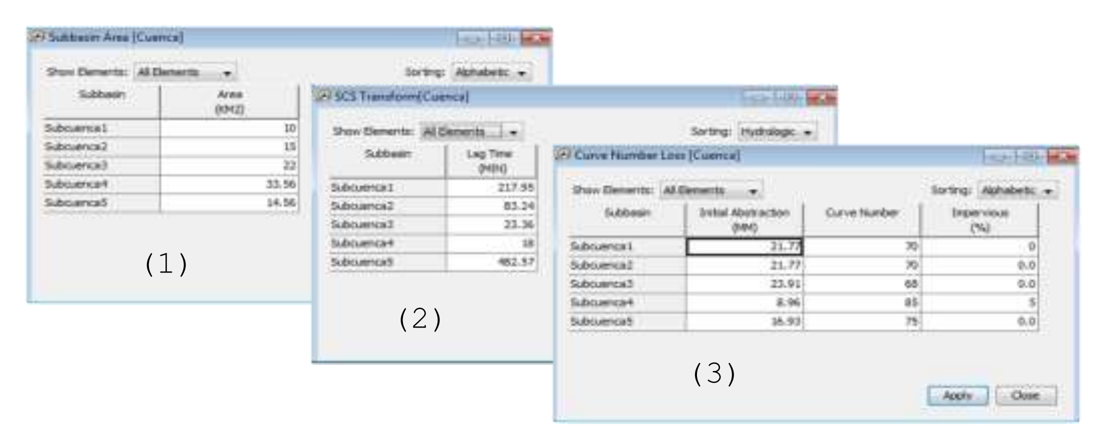


Figura 2.22: Ventanas que se muestran en el escritorio de HEC-HMS 3.5 al seleccionar la opción *Parameters>Subbasin Area (1) / Parameters> Transform> SCS Unit Hydrograph (2)/Parameters>Loss>SCS Curve Number (3*), respectivamente. En las mismas deben ingresarse los parámetros: (1) área de la subcuenca, (2) tiempo Lag y (3) CN, porcentaje de impermeabilidad y abstracción inicial.

La información básica de cada cauce requerida para la simulación es el tiempo Lag (min). La incorporación de esta información se puede realizar de dos maneras. Una posibilidad es hacerlo de un cauce a la vez seleccionando en el explorador de cuenca un determinado cauce y a continuación en el editor de componentes ingresar el tiempo Lag del mismo en la solapa *Routing*(Figura 2.23).

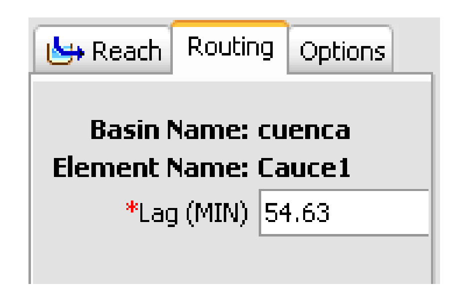


Figura 2.23: Editor de componentes de HEC-HMS 3.5 donde se muestra la solapa *Routing*para asignar el tiempo Lag del cauce seleccionado en el explorador de cuenca.

La otra alternativa es hacerlo para todos los cauces al mismo tiempo, seleccionando en el explorador de cuenca una determinado cauce y luego en la barra de herramientas ir a *Parameters>Routing.* A continuación se abrirá una ventana (Figura 2.24) en la que se debe seleccionar *Show Elements>All elements* para que se muestren todos los cauces y también se puede escoger como se desean visualizar las mismas, si ordenadas alfabética o hidrológicamente seleccionando *Sorting>Alfabetic / Hydrologic,* respectivamente.

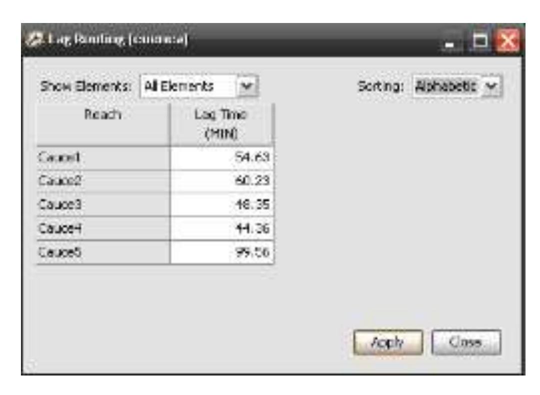


Figura 2.24: Ventana que se muestra en el escritorio en HEC-HMS 3.5 al seleccionar la opción *Parameters>Routing*. En la misma debe completarse el parámetro tiempo lag de los cauces.

Cabe aclarar que para ingresar los valores correspondientes a los parámetros requeridos tanto para las subcuencas como para los cauces, los mismos pueden ser copiados desde una planilla de cálculo y luego pegados en los lugares correspondientes en HEC-HMS 3.5.

Microembalses

Lo primero que debe realizarse es crear las tablas de datos apareados que contienen las relaciones altura-descarga, altura-almacenaje y almacenaje-descarga de agua para todos los tipos de embalses presentes en la cuenca. Para ello, seleccionar en la barra de herramientas *Components>Paired Data Manager.* En la ventana que se abrirá a continuación, escoger en el cuadro de selección la opción *Storage-Discharge Functions* y luego *New.* Se abrirá una nueva ventana en la que se debe poner nombre a la tabla que se creará y una descripción opcional. Los mismos pasos se deben seguir para las opciones *Elevation-Discharge Functions* y *Elevation-Storage Functions.* Para cada una de las 3 opciones se pueden crear tantas tablas de relaciones como sean necesarias (Figura 2.25). Todas las tablas originadas se mostrarán en el explorador de cuencas debajo de cada relación en la carpeta *Paired Data* (Figura 2.26).

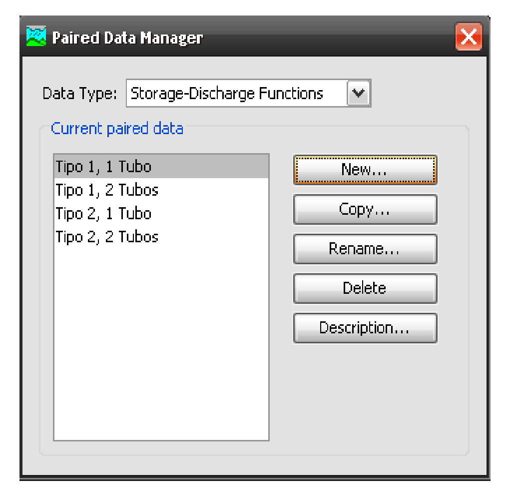


Figura 2.25: Ventana que se muestra en el escritorio de HEC-HMS 3.5 al seleccionar *Components>Paired Data Manager* que permite crear las tablas con las relaciones altura-almacenaje, altura-descarga y almacenaje-descarga de los microembalses presentes en la cuenca.

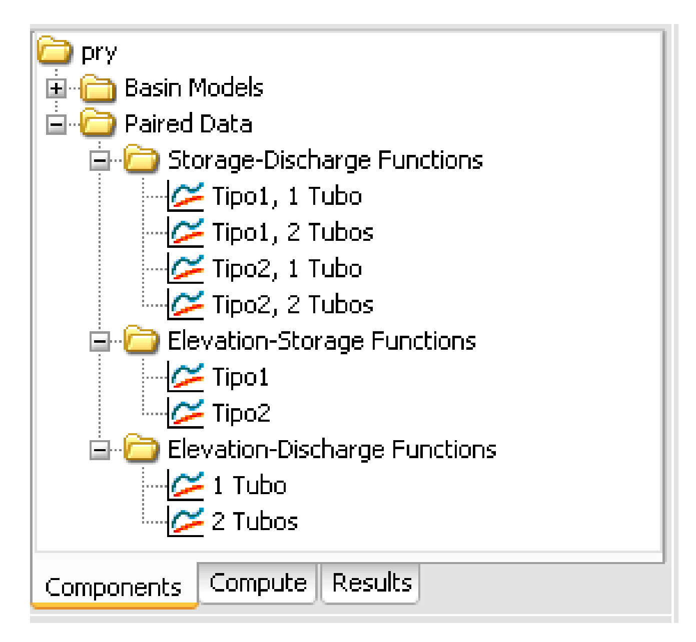


Figura 2.26: Explorador de cuenca de HEC-HMS 3.5 en el que se muestran las tablas creadas con las relaciones altura-descarga, altura almacenaje y almacenaje-descarga para asignar a los microembalses.

Luego de creadas las tablas es necesario ingresar la información en las mismas seleccionando cada una en el explorador de cuenca y dirigiéndose a la solapa *Table* en el editor de componentes (Figura 2.27). Los datos pueden ser copiados y pegados desde una planilla de cálculo.

Paired Data | Table | Graph

Storage (1000 M3)	Discharge (M3/S)
0,0	0.00
26,0	0,99
158,0	1,79
502,0	2,41
1162,0	2,96

Figura 2.27: Editor de componentes de HEC-HMS 3.5 donde se muestra la solapa *Table* con los datos ingresados para una tabla de relación de microembalses seleccionada en el explorador de cuenca**.**

Finalmente es necesario asignarle a cada embalse creado en el modelo de cuenca la relación altura-almacenaje, altura-descarga y almacenaje-descarga que sea más conveniente para cada uno. Para ello debe seleccionarse cada embalse en el explorador de cuenca y luego en el editor de componentes en la solapa *Reservoir,* en el cuadro de selección *Storage Method*elegir*Elevation-Storage-Discharge.* A continuación, en los cuadros de selección *Stor-DisFunction*y*Elev-StorFunction*elegir la tabla de relaciones más apropiada para cada uno. Por último en la solapa *Options*, seleccionar la tabla apropiada en el cuadro de selección *Elev-Discharge* (Figura 2.28). Todas las demás opciones de ambas solapas deben ser completadas de acuerdo a las necesidades. Este proceso debe repetirse para cada uno de los microembalses dispuestos en el modelo de cuenca.

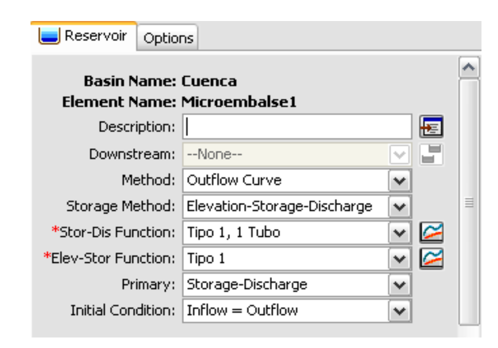


Figura 2.28: Editor de componentes de HEC-HMS 3.5 donde se muestran las opciones de selección para cada microembalse escogido en el explorador de cuencas.

Creación de tormentas de proyecto. Manejador de datos de series de tiempo

Por tormenta de proyecto se designa a las precipitaciones ficticias que crea el usuario definiendo su intensidad y duración y que serán utilizadas para la simulación. Para crearlas, ir a *Components>Time-Series Data Manager* y en la ventana que se desplegará (Figura 2.29) seleccionar *Precipitation Gages* en el cuadro de selección *Data Type.* Luego, en *New* se debe seleccionar el nombre que quiere dársele a la tormenta. Es posible crear tantas tormentas diferentes como se necesiten.



Figura 2.29: Ventana para creación de tormentas de proyecto en HEC-HMS 3.5

En el explorador de cuencas se incorporará automáticamente la carpeta *Time-Series Data* conteniendo otra denominada *Precipitation Gages* que contiene todas las tormentas creadas y que a su vez cada una contiene una subcarpeta que permitirá, al ser seleccionada, cargar la información correspondiente a la tormenta en el editor de componentes (Figura 2.30).

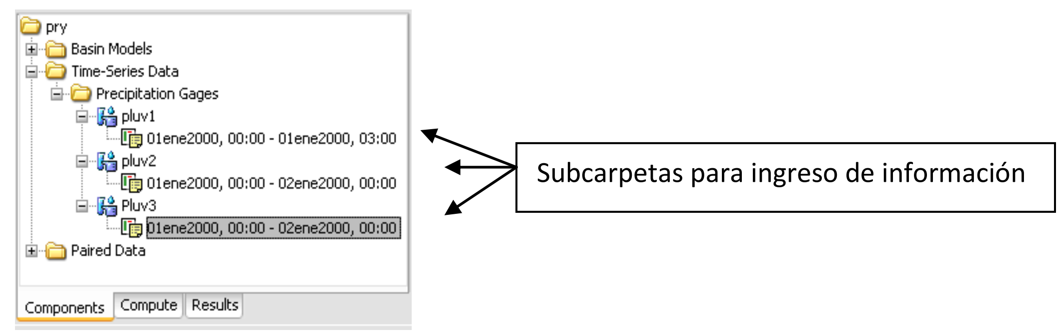


Figura 2.30: Explorador de cuencas de HEC-HMS 3.5 indicándose las subcarpetas que se deben seleccionar para el ingreso de la información correspondiente a cada tormenta de proyecto.

Una vez creadas las tormentas de proyecto se debe completar la información correspondiente a cada una. Entonces, al seleccionar una tormenta determinada en el explorador de cuencas, se mostrará la solapa *Time-Series Gage* en el editor de componentes. Dentro del mismo se deberán escoger las opciones *Manual Entry* e *Incremental Millimiters* en los cuadros de selección *Data Source* y *Units* respectivamente. En el cuadro *Time Interval* deberá escogerse el intervalo de tiempo que desea dársele a la tormenta. Posteriormente, al seleccionar subcarpeta para ingreso de información en el explorador de cuencas se mostrarán cuatro solapas en el editor de componentes (Figura 2.31).

Time-Series Gage | Time Window | Table | Graph

Time (ddMMMYYYY, HH:mm)	Precipitation (MM)
01ene2000, 00:00	
01ene2000, 00:30	10
01ene2000, 01:00	36
01ene2000, 01:30	5
01ene2000, 02:00	9
01ene2000, 02:30	12
01ene2000, 03:00	10

Figura 2.31: Editor de componentes de HEC-HMS 3.5 donde se muestran las solapas donde se debe ingresar la información requerida para cada tormenta de proyecto. Se trata de una tormenta de 3 horas de duración, dividida en 6 intervalos de media hora (sextiles), con el pico de lluvia en el segundo sextil (36 mm).

La solapa *Time-Series Gage* fue editada en el paso anterior. En *Time Window* debe especificarse fecha y horario de comienzo y finalización de la tormenta, en *Table* deben ingresarse los milímetros de precipitación para cada intervalo de tiempo para toda la duración de la tormenta y en *Graph* se mostrará el gráfico de distribución de la precipitación en el tiempo.

Creación del modelo meteorológico

En el modelo meteorológico se cargan en cada subcuenca las precipitaciones creadas anteriormente. Para su creación, seleccionar en la barra de herramientas *Components>Meteorological Model Manager* y en la ventana que se muestra a continuación escoger *New* y darle un nombre al modelo. En el explorador de cuencas se mostrará la carpeta *Meteorologic Model* conteniendo el modelo creado y dentro de este a su vez a la opción *Specified Hyetograph* (Figura 2.32). Pueden crearse tantos modelos meteorológicos como se requiera.

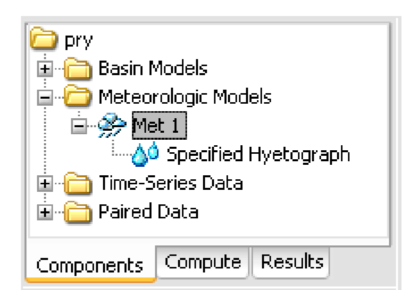


Figura 2.32: Explorador de cuencas de HEC-HMS 3.5 en el que se observan el modelo meteorológico y sus componentes.

Al seleccionar el modelo creado, aparecerán tres solapas en el editor de componentes. En la denominada *Basins* seleccionar la opción *Yes* en el cuadro de texto que aparece al lado de cada cuenca para que el programa habilite la opción de cargarle a cada subcuenca la tormenta proyecto correspondiente (Figura 2.33).

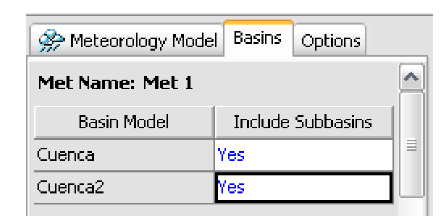


Figura 2.33: Editor de componentes de HEC-HMS 3.5 donde se muestran las solapas correspondientes al modelo meteorológico seleccionado.

Por último, se debe seleccionar *Specified Hyetograph* en el explorador de cuenca y escoger en el editor de componentes la tormenta de proyecto que se le quiera asignar a cada subcuenca (Figura 2.34).

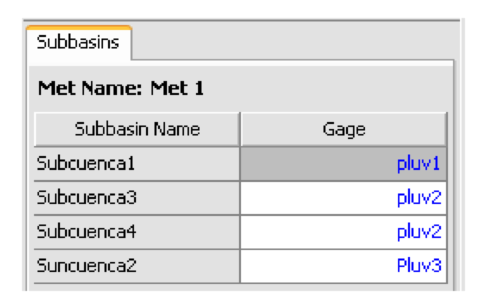


Figura 2.34: Editor de componentes de HEC-HMS 3.5 donde se deben seleccionar las tormentas de proyectos asociadas a cada subcuenca.

Definición de las especificaciones de Control

Las especificaciones de control hacen referencia a la duración de la simulación e intervalo de cálculo que se utilizará en la misma. Para definirla, seleccionar en la barra de herramientas *Components>Control Specification Manager* y luego *New* en la ventana que se abrirá a continuación. Aquí se debe poner el nombre que se desee y una descripción opcional y es posible crear tantas especificaciones de control como se desee. En el explorador de cuenca se incorporará una carpeta denominada *Control Specifications* conteniendo las especificaciones de control creadas (Figura 2.35).

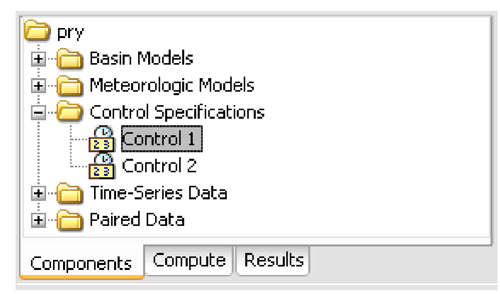


Figura 2.35: Explorador de cuencas de HEC-HMS 3.5 en el que se observan las especificaciones de control creadas.

Por último, al hacer clic en cada especificación de control se habilitará una solapa en el editor de componentes donde se deben incorporar las fechas y horas de comienzo y finalización de la simulación e intervalo de cálculo (Figura 2.36). La duración de la simulación debe ser mayor que la de la tormenta proyecto y el intervalo puede ser igual o diferente.

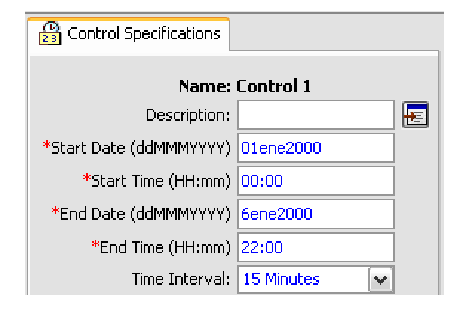


Figura 2.36: Editor de componentes de HEC-HMS 3.5 donde se deben definir las especificaciones de control.

2.3.4. Creación y ejecución de la simulación

Una vez definido el modelo de cuenca, la lluvia de diseño, los datos apareados, el modelo meteorológico y las especificaciones de control, se está en condiciones de realizar la simulación, sólo resta definir, integrar y combinar todas estas opciones.

Para crear la simulación debe seleccionarse en la barra de herramientas *Compute>Create Simulation Run* y darle un nombre en la ventana que se crea. A continuación deben seleccionarse el modelo de cuenca, el modelo meteorológico y la especificación de control que se desean utilizar sucesivamente (Figura 2.37).

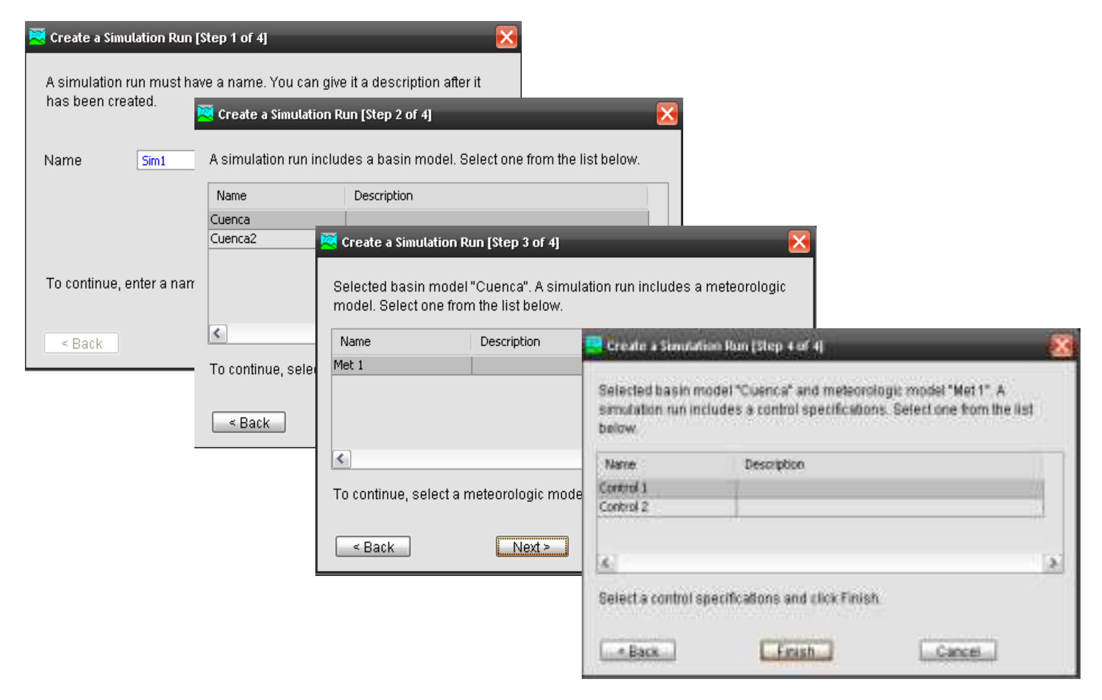


Figura 2.37: Ventanas para creación de simulación en HEC-HMS 3.5. En orden sucesivo de de aparición de izquierda a derecha: Nombre de la simulación, Selección de modelo de cuenca, Selección de modelo meteorológico y selección de la especificación de control.

Luego ir a *Compute>Select Run,* escoger la simulación creada y finalmente seleccionando *Compute>Compute Run* o el ícono de la barra de herramientas se hace correr la simulación.

Una vez activada la simulación, el programa corre, si la corrida es exitosa se completará el 100 % en una ventana indicadora. Si existieron errores o inconsistencias la simulación no concluirá y aparecerán los informes de error en el panel de registro de mensajes.

2.3.5. Visualización de resultados

En la barra de herramientas se presentan los 4 comandos que permiten visualizar los resultados luego de hacer correr la simulación. Estos son *Tabla Resumen Global, Gráfico para el elemento seleccionado, Tabla resumen para el elemento seleccionado y Tabla de series de tiempo para el elemento seleccionado* (Figura 2.38).

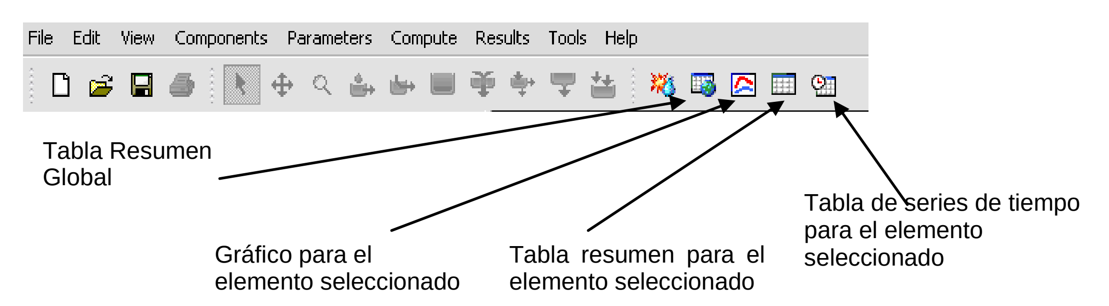


Figura 2.38: Comandos para visualización de resultados luego de correr la simulación en la barra de herramientas de HEC-HMS 3.5

Haciendo clic en el escritorio y luego seleccionando cualquiera de los cuatro comandos de visualización en la barra de herramientas, se desplegarán diferentes ventanas con los resultados correspondientes (Figura 2.39). La Tabla Resumen Global contiene todos los elementos hidrológicos del modelo de cuenca, el caudal pico (m^3/s) de cada uno, la fecha y el horario en el que se produce ese caudal pico y el volumen de agua en milímetros. El Gráfico para cada elemento seleccionado muestra la variación del caudal de agua en milímetros y la variación de caudal en metros cúbicos por segundo, en relación al tiempo transcurrido desde que comienza la simulación, es decir el hidrograma de creciente de dicho elemento. La Tabla resumen para el elemento seleccionado presenta el caudal pico (m^3/s) de ese elemento y la precipitación, infiltración, escorrentía y descarga (mm). Por último, la Tabla de series de tiempo para el elemento seleccionado contiene la precipitación, infiltración y exceso de agua en milímetros y los flujos directos, base y total en metros cúbicos por segundo para el intervalo de tiempo definido en las especificaciones de control.

También es posible acceder a los resultados de cada elemento del modelo de cuenca (subcuenca, cauce, unión, embalses, fuente, sumidero), haciendo click en el boton derecho con el mouse sobre el elemento y seleccionando la opción de visualización de resultados deseada.

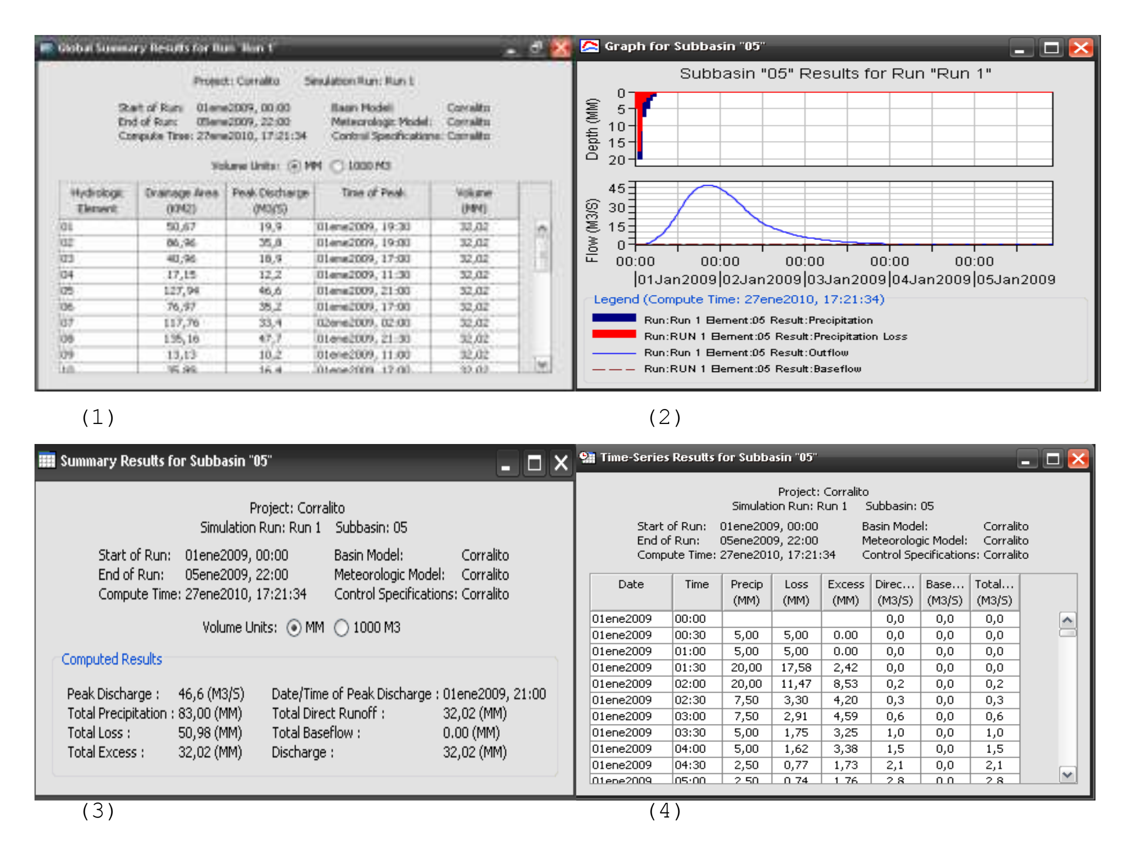


Figura 2.39: Ventanas de resultados de simulación en HEC-HMS 3.5. *Tabla Resumen Global (1), Gráfico para el elemento seleccionado(2), Tabla resumen para el elemento seleccionado (3) y Tabla de series de tiempo para el elemento seleccionado (4).*

2.3.6. Guardar proyecto

Se recomienda guardar periódicamente el proyecto, mientras se está trabajando, a los fines de no perder información. El proyecto se guarda donde el usuario lo indique, y se puede acceder a él mediante el comando *File >Save as*.

2.3.7. Usos principales del modelo HEC-HMS

- Estimación de caudales pico de cuencas y subcuencas para diseño de estructuras de conducción y control de escurrimientos (canales, defensas de cabecera de cárcavas, alcantarillas, etc.).
- Análisis de sensibilidad de diferentes parámetros del modelo (CN, lag, impermeabilidad de cuencas, etc.) sobre el caudal de las cuencas. Se pueden evaluar cambios de uso del suelo, efectos de la urbanización, efecto de prácticas de conservación, etc.
- Evaluación y diseño de estructuras de regulación (embalses), derivaciones, etc.

Bibliografía

Castiglioni M G, Massobrio M, Chagas C I, O.J. Santanatoglia.1998.Predicción de hidrogramas modificando el tiempo de concentración de una microcuenca de Pampa Ondulada, con pendientes menores al 2 %. Ciencia del Suelo 16 (2):134-136.

Chow, V. T.; Maidment, D. y L. W. Mays (Eds.). 1993. Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill. 584 pp.

ITS Spanish. 2005. Manual introductorio en español para el uso de HEC-HMS (v2.2.2). http://www.itspanish.org/modules.php?name=Downloads&d_op=viewdownload &cid=6&min=40&orderby=titleA&show=10. Fecha de último acceso Enero2012.

Morgan R.P.C. y R. J. Rickson, 1995. Slope Stabilization and Erosion Control- A Bioengineering Approach. E & FN SPON. Inglaterra. 274 pp.

Nanía, L. S. 2007. Manual básico de HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1. http://www.ugr.es/~lnania/_private/ManualBasico_HEC-HMS300_HEC-GeoHMS11_Espanol.pdf. Fecha de último acceso Enero/2012.

Ramser,1929. Flow of water in drainage channels: The results of experiments to determine the roughnes. Department of Agriculture. Washington, EEUU.

Schwab, G.; Frevert, R.; Edminster, T. y K. Barnes. 1990. Ingeniería en Conservación de suelos y aguas. Noriega-Limusa. México.

Temez, P.J. R. 1991. Generalización y mejora del método racional.Versión de la Dirección General de Carreteras de España. Ingeniería Civil 82: 51–56.

UNSW. 2012. Connected Waters. www.connectedwaters.unsw.edu.au/resources/fact/water_resources.html Fecha de último acceso Mayo de 2012.

USACE (US Army Corp of Engineers). 2010. HEC-HMS Hydrologic model System, Version 3.5. En: http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documen-tation/ HEC-HMS_ Users_Manual_3.5.pdf. Fecha de último acceso Enero2012

USDA-SCS, 1968. A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watershed. Scs. Pp 149.

USDA-SCS. 1972. Section 4: Hydrology. In National Engineering Handbook (NEH). Washington, D.C.: USDA Soil Conservation Service.

Capítulo 3:
El proceso de la erosión hídrica

3.1. Conceptos básicos

Del latín *erosĭo*, la erosión es el desgaste que se produce en la superficie del suelo por la acción de agentes externos (como el viento o el agua) o por la fricción continua de otros cuerpos. La erosión hídrica es el proceso por el cual se produce el desprendimiento, transporte y depositación de las partículas de suelo por acción de los siguientes agentes principales:

- La energía cinética de la gota de lluvia: La energía de las lluvias se disipa sobre la superficie del suelo produciendo la ruptura de los terrones y agregados, generando una salpicadura (erosión por salpicadura) que desprende partículas que luego son arrastradas pendiente abajo. Este fenómeno de disipación de la energía de la lluvia está relacionado a la pérdida de infiltración del suelo, como será discutido en el Capítulo 4.
- La escorrentía en movimiento: Este agente erosivo produce el desprendimiento de nuevo suelo y el transporte del suelo removido, en una magnitud proporcional al caudal escurrido y a la velocidad que adquiere el flujo de agua sobre la superficie. Este agente produce los fenómenos erosivos más visibles (por ejemplo cárcavas), y es el responsable del movimiento de las partículas de suelo removidas. Pueden distinguirse dentro de la escorrentía dos tipos de flujo: el flujo laminar (erosión laminar o mantiforme), que se mueve con una velocidad lenta, y el flujo turbulento/concentrado o flujo en surcos (erosión en surcos), con una velocidad que puede llegar a 4 m/s, y que es el responsable de la mayor parte del transporte de sedimentos. La energía puesta en juego en cada tipo de erosión, y la magnitud del transporte de sedimentos generada por cada una de ellas se indica en la Tabla 3.1 (Morgan, 1995).
- La gravedad: La sola acción de la gravedad es capaz de mover el suelo, especialmente cuando está mojado y en ambientes de altas pendientes. Los movimientos en masa, deslizamientos de laderas, erosión lateral de meandros de ríos, avalanchas de nieve son ejemplos de la acción de la gravedad en procesos erosivos (Troeh *et al*., 1991). El manejo y la estabilización de laderas inestables por acción de la gravedad es discutido en el Capítulo 7.

Tabla 3.1: Energía y eficiencia de cada forma de erosión hídrica (Morgan, 1995).

Forma de erosión	**Masa***	**Velocidad típica (m/s)**	**Energía cinética ****	**Energía para erosión*****	**Transporte de sedimentos observado (g/cm)******
Salpicadura (gota de lluvia)	R	9	40.5 R	0,081 R	20
Mantiforme (laminar)	0.5 R	0.01	2.5×10^{-5} R	7.5×10^{-7} R	400
Surcos (turbulento)	0.5 R	4	4R	0,12 R	19000

*Se asume que la masa es igual a la lluvia R, y que el escurrimiento es el 50 % de la lluvia (0.5 R)
** Basada en ½ m V^2
*** Se asume que el 0,2 % de la energía de la gota y el 3 % de la energía cinética del escurrimiento es utilizada para causar erosión.
**** Valores medidos durante 900 días, para un suelo arenoso, en una pendiente del 19 %.

Como se desprende de la Tabla 3.1 la mayor parte de la energía de las gotas de lluvia contribuyen al desprendimiento, más que al transporte, como lo muestra la alta energía puesta en juego en la salpicadura (40.5 R), la cual se gasta en desprender partículas, producir un sello en la superficie del suelo y en poner en suspensión las partículas desprendidas. La erosión mantiforme tiene la menor energía cinética para desprender partículas, pero el flujo es capaz de transportar una elevada cantidad de los sedimentos desprendidos, mientras que el flujo concentrado en surcos, posee una mayor energía, tanto para desprender partículas, como para poder transportarlas eficientemente.

De estas consideraciones surge que la erosión hídrica y los procesos de desprendimiento, transporte y depositación (también llamada sedimentación) forman parte de un mismo fenómeno complejo en cuanto a sus causas, dinámico en el tiempo y susceptible de ser estudiado y tratado a diversas escalas de tiempo y espacio.

En una escala elemental de lote o ladera o aun menor, de sitio específico, la erosión hídrica puede estar limitada por la capacidad de desprendimiento o por la capacidad de transporte. Tanto la lluvia como el escurrimiento tienen ambos capacidad de desprendimiento de suelo y de transporte de sedimentos, siendo aquel proceso que ocurra en menor medida el que finalmente determina cuanto suelo se pierde de una ladera (Kirby y Morgan, 1994). En la Figura 3.1 se indica la posible interacción entre ambos procesos.

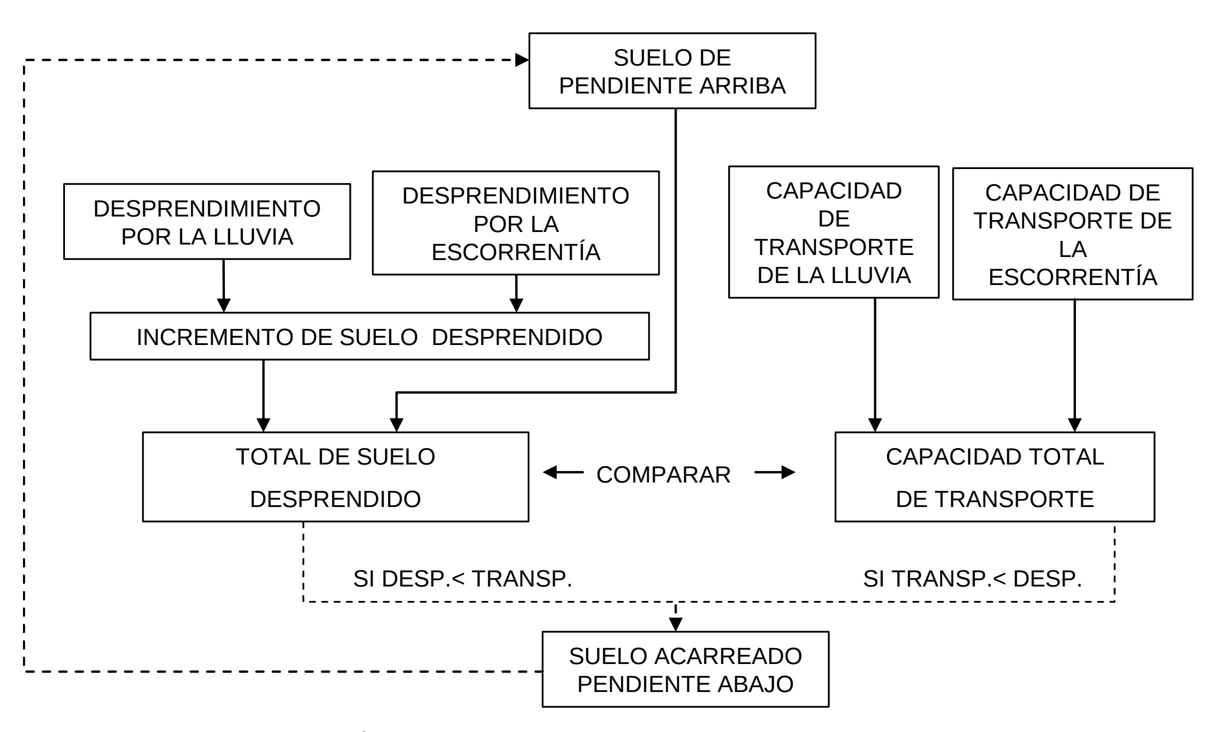


Figura 3.1: Posible interacción entre los procesos de transporte y de desprendimiento (Meyer y Wischmeier, 1969).

El desprendimiento por la lluvia se da principalmente en la erosión por salpicadura, la cual actúa sobre los agregados del suelo, desestabilizándolos y generando costras y sellos superficiales, afectando principalmente a la tasa de infiltración (Ver Capítulo 4). El sellado superficial se produce en momento que la gota impacta contra el suelo, generando una desorganización de las partículas de suelo; mientras que el encostramiento es un proceso que se da una vez que deja de llover y las partículas sufren una sedimentación diferencial por su peso, reacomodando la superficie, una vez que el suelo se va secando. Este proceso se da en los

microrelieves producidos por la labranza, en los que ha habido retención superficial del agua. La cantidad de suelo desprendido por lluvia es directamente proporcional a la energía cinética y a la pendiente, e inversamente proporcional a la lámina de agua sobre la superficie (efecto protector del agua acumulada). Este proceso de erosión es el que predomina en las partes altas de las pendientes.

El desprendimiento por la escorrentía comienza cuando se han superado la retención y el detenimiento superficial (Capítulo 2). La capacidad de desprendimiento de la escorrentía está determinada por el tipo de flujo: laminar o turbulento. En el flujo laminar cada capa de flujo se mueve uniformemente, a una velocidad lenta (Ver Tabla 3.1), mientras que en el flujo turbulento el agua forma un complejo patrón de rulos y las capas de agua se mezclan unas con otras, debido a su velocidad.

El desprendimiento por escorrentía comienza cuando las fuerzas de tracción del agua superan la resistencia al corte del suelo. La resistencia tractiva del agua depende de su velocidad y viscosidad, mientras que la resistencia al corte del suelo depende del grado y estabilidad de la estructura y del tamaño de partículas. Existe un tamaño de partículas de máxima susceptibilidad al desprendimiento, de alrededor de 200 micrones (arena muy fina y fina), es decir, en la cual la velocidad del agua necesaria es mínima. Partículas de mayor tamaño son más pesadas, y las de menor tamaño tienen mayores fuerzas de cohesión.

La velocidad del escurrimiento superficial está regida por la ecuación de Manning, y depende de un coeficiente de rugosidad (n) dado por las características de la superficie, del radio hidráulico (R) que depende del espesor de la capa de escorrentía, y de la pendiente (S) del terreno (Capítulo 6).

La capacidad de transporte de la escorrentía es proporcional al caudal escurrido (Q) y a la velocidad de la corriente (V). Cuando la velocidad llega a un umbral mínimo, en el que las partículas de suelo no pueden mantenerse dentro del flujo, comienza el proceso de sedimentación. Inversamente cuando un flujo erosivo tiene colmada su capacidad de transporte de sedimentos, estos comienzan a depositarse y el flujo no produce un desprendimiento adicional. En otras palabras, cuanto menos sedimento lleva un flujo de escorrentía, mayor es su capacidad de desprendimiento, el cual se va reduciendo paulatinamente hasta que se colma la capacidad de transporte (el flujo se satura de sedimento). Se conoce como el fenómeno de "aguas claras" al incremento de la capacidad erosiva de un flujo, cuando pierde su carga de sedimentos (por ejemplo por efecto de un embalse). En estas condiciones el flujo incrementa su potencial erosivo aguas abajo del embalse, debiendo preverse este efecto entre los posibles impactos ambientales negativos de este tipo de obras (Kirby y Braken, 2005).

El comportamiento de los tipos de suelos frente a estos procesos es variable, ya que en algunos suelos la erosión estará limitada por la capacidad de desprendimiento, y en otros por la capacidad de transporte. En suelos arcillosos, de alta cohesión y adhesión de partículas, la erosión estará limitada por la capacidad de desprendimiento de suelo, tanto por lluvia como por escorrentía. En este caso, si bien la generación de escorrentía Q puede ser alta, la resistencia del suelo hace que la tasa de erosión quede limitada por el desprendimiento. En el caso extremo de los suelos arenosos, con muy baja estabilidad del material, la erosión estará limitada por la capacidad de transporte, ya que los suelos presentan alta permeabilidad, con lo cual el caudal Q será bajo, a pesar de que las partículas pueden ser desprendidas fácilmente. En el caso de los suelos limosos o franco arenosos finos, las tasas de erosión son máximas ya que, por un lado las partículas pueden ser fácilmente desprendidas por su tamaño y relativamente baja estabilidad, y por otro son suelos que al sufrir encostramiento pueden generar grandes volúmenes de escorrentía, con lo cual la erosión no estará limitada por ninguno de ambos procesos.

3.2. Principales causas y consecuencias de la erosión hídrica

La erosión hídrica es un proceso complejo, multicausal, dinámico, de tipo episódico y sujeto a un conjunto de causas que ocurren en el ámbito de una cuenca hidrográfica (Figura 3.2).

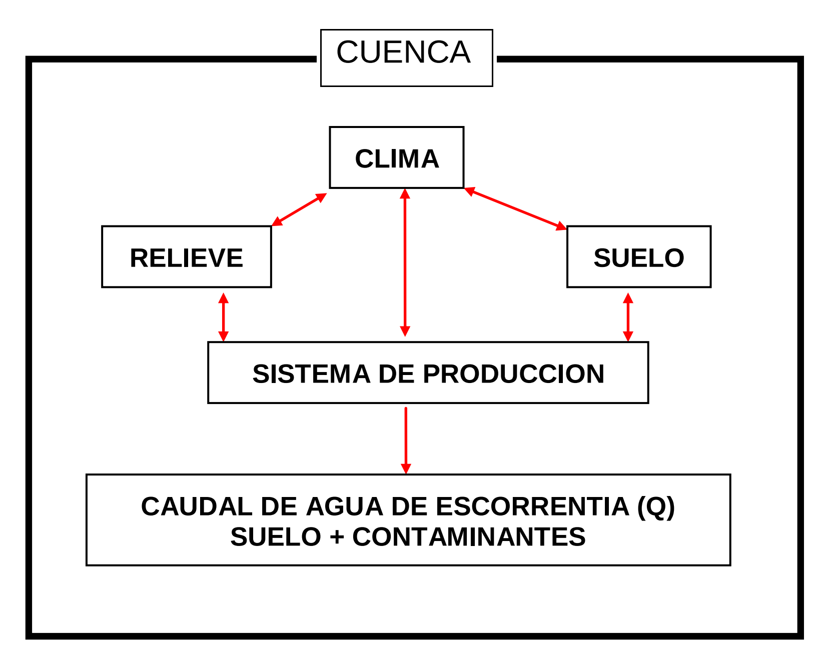


Figura 3.2: Factores que intervienen el proceso de erosión hídrica.

La complejidad del proceso deriva de que puede ser visto a diferentes escalas de tiempo y espacio. En la escala temporal el proceso se da por eventos, es decir en forma episódica, con un grado de probabilidad determinado por el comportamiento del factor climático y la ocurrencia de tormentas de alta energía, coincidentes con momentos de alta susceptibilidad del suelo y relieve a la ocurrencia del fenómeno.

En una escala de tiempo mayor la paulatina pérdida de suelo genera efectos de retroalimentación en la erosión a través de la pérdida de horizontes de suelo de mayor resistencia, lo cual hace que el proceso no sea lineal en el tiempo, sino que frecuentemente es acelerado en el tiempo. Es el caso de la erosión de laderas de montaña, en la cual a medida que se pierde el suelo sobre la roca, se incrementan las tasas de escorrentía y por lo tanto se acelera la pérdida de suelo en un ciclo de retroalimentación positiva, hasta que el suelo desaparece por completo y queda la roca expuesta. Otro ejemplo es la retroalimentación que ocurre con la erosión en cárcavas, que van creciendo en profundidad, en ancho y en ramificaciones, a medida que el proceso avanza.

En la escala espacial la erosión puede ser considerada a escala de lote o parcela, en la cual se pueden analizar las formas más elementales de erosión: salpicadura, mantiforme y en surcos. A esta escala es posible controlar estos procesos erosivos básicos mediante la aplicación de técnicas que se discuten en los capítulos 4 y 5.

En una escala de cuenca pueden visualizarse otros procesos erosivos como cárcavas y erosión de márgenes de ríos y arroyos, y es necesario considerar una visión más amplia del problema, no registrable sólo a escala de lote. La resolución de estos procesos requiere una mayor participación de los involucrados en la cuenca, como así también del conjunto de decisores con incumbencia en el ámbito de la cuenca (poblaciones, organismos públicos, consorcios, etc.).

En una escala aún mayor la erosión se relaciona con los procesos de inundación-sedimentación, de la cual forma parte esencial, por ocurrir en los sectores altos de las cuencas. El control de la erosión a esta escala, permite el abordaje de los efectos extra-prediales del fenómeno y que generan daños (externalidades negativas) que pueden observarse cíclicamente en fenómenos de rotura de infraestructura de rutas y caminos, desborde de arroyos, sedimentación de depresiones, etc.

A continuación se analizan brevemente las principales causas de la erosión hídrica.

3.2.1. Clima

El principal factor climático que influye en la erosión hídrica es la precipitación, y su energía cinética. En relación a su origen, las tormentas pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- Ciclónicas: Son las provocadas por los frentes de masas de aire con diferente temperatura y humedad y se caracterizan por abarcar grandes extensiones de territorio.
- Convectivas: Se producen por el ascenso repentino de masas de aire caliente, son las tormentas de verano, son de extensión más localizada y frecuentemente de alta intensidad.
- Orográficas: Se presentan cuando masas de aire húmedo son obligadas a ascender al encontrar una barrera montañosa. Su distribución también es errática, y de alta intensidad.

El estudio de las precipitaciones es importante dentro de cualquier estudio referido al manejo de la erosión hídrica, ya sea a nivel de una cuenca, como así también a nivel regional. Dentro de la caracterización de las lluvias interesa conocer:

- Cantidad y distribución: Es el registro más fácil de obtener en estaciones del ferrocarril, servicio meteorológico, aeropuertos, estaciones experimentales, etc. La precipitación media y su distribución indica los períodos críticos en cuanto a la ocurrencia de tormentas erosivas.
- Intensidad: La intensidad de una precipitación define la energía cinética que desencadena los procesos de desprendimiento y escurrimiento. Su caracterización ya fue discutida en el Capítulo 2, y luego se retoma su consideración al analizar los modelos de erosión.

3.2.2. Relieve

Como se mencionó, dentro del relieve el principal parámetro a tener en cuenta en los procesos de erosión hídrica es el grado o inclinación de la pendiente, la que se puede expresar en porcentaje o en grados sexagesimales, siendo el porciento de pendiente igual a la tangente del ángulo de inclinación de la misma (una pendiente del 5 % corresponde a un ángulo de inclinación de aproximadamente 3°; una pendiente de 100 % corresponde a una inclinación de 45°).

La longitud de la pendiente es otro factor que define la cantidad de erosión de una ladera y la velocidad terminal de la escorrentía. La exposición solar de la pendiente tiene importancia en zonas de montaña, ya que influye sobre la insolación, temperatura y humedad del suelo y por lo tanto, sobre la posibilidad de instalación de

la vegetación y la susceptibilidad a erosión. Por último la complejidad de la pendiente hace referencia a la mayor o menor uniformidad de gradientes, direcciones y longitudes, y es un parámetro importante de considerar al momento de planificar el control de la erosión mediante técnicas de manejo del relieve (Capítulo 5).

3.2.3. Suelo

La erosionabilidad o erodabilidad del suelo es una medida de la susceptibilidad al desprendimiento y transporte por los agentes de la erosión. La erodabilidad es un efecto integrado de los procesos que regulan la absorción de la lluvia y la resistencia de las partículas del suelo al desprendimiento y posterior transporte. Estos procesos están influidos por las propiedades del suelo tales como tamaño de partículas, estabilidad de agregados, materia orgánica, cantidad y tipo de arcillas o por características edáficas que afectan la estructura del suelo y la transmisión de agua. Algunos parámetros que cuantifican la erodabilidad se discuten más adelante.

3.2.4. Sistema de producción

En un sentido amplio, los sistemas de producción son las formas en que la sociedad hace uso de los recursos naturales de una cuenca, especialmente en este caso nos interesa la relación sociedad-naturaleza vinculada al uso y manejo de las tierras. Deben incluirse en este caso las interacciones del sistema agropecuario con el resto de los sectores de una sociedad (urbano, suburbano, industrial, extractivo, etc.) ya que es la interacción del conjunto la que define las formas de uso en un momento determinado de la evolución social.

Cada sistema de producción incide de manera distinta sobre los demás componentes del sistema, pudiendo responder a las condiciones ecológicas del área, o estar definido por otros factores: económicos, de mercados, gustos personales, asesoramiento técnico, etc., que pueden hacer que la intensidad del proceso de erosión se vea modificada.

El aspecto más directo del uso y manejo de los suelo sobre la erosión se relaciona con el efecto de protección de la superficie del suelo por la vegetación o restos de ella. Estos aspectos del manejo son discutidos en el Capítulo 4.

Otros aspectos del uso y manejo de las tierras tienen relación con la presión de uso sobre ambientes naturales o seminaturales como las sierras, los pedemontes, las zonas boscosas y las riberas de los ríos y arroyos. La eliminación de la vegetación, el sobrepastoreo o la quema indiscriminada son factores que aceleran los procesos erosivos, e incrementan las tasas de sedimentación de tierras. La contaminación de cursos superficiales con nutrientes derivados de fertilizantes fosforados, con pesticidas y otros agroquímicos es otra de las consecuencias del incremento de los procesos erosivos.

La sobreexplotación de áridos (arena para la construcción) o la minería a cielo abierto en ambientes serranos son otro de los factores que implican serios impactos ambientales negativos por el posible incremento en las tasas de erosión, en la degradación de cursos de agua y en la probable contaminación por fuente puntual. La disminución del nivel de base del río Cuarto por erosión de fondo, es una de las consecuencias importantes de los desajustes en el uso y manejo de tierras tanto en la región serrana, como en las cuencas agrícolas y en el propio lecho del curso. En la

Tabla 3.2 se sintetizan los principales efectos del sistema erosión-sedimentación, a diferentes escalas.

Tabla 3.2: Principales consecuencias de los procesos de erosión y sedimentación

Erosión – escurrimiento	Sedimentación
Destrucción de tierras productivas (cárcavas)	Pérdida de capacidad productiva de los suelos (por deposición de sedimentos
Pérdida de capacidad productiva del suelo (erosión laminar y en surcos)	Tapado y desborde de canales por obturación con sedimentos
Pérdida de agua para los cultivos (productividad de corto plazo)	Colmatación de embalses (reducción de vida útil y funcionalidad)
Destrucción de infraestructura vial y urbana (puentes, alcantarillas, caminos rurales y rutas)	Sedimentación de depresiones naturales (pérdida de funcionalidad)
Deterioro de ecosistemas de ribera (bordes de rios y arroyos)	Contaminación de aguas por sedimentos (mayores costos de potabilización)
Contaminación de aguas superficiales (P, herbicidas, insecticidas)	Pérdida de calidad visual y paisajística.
Inundación de depresiones, poblaciones, caminos y tierras productivas	Aumento de costos de dragado de puertos.
Mayor inestabilidad y riesgos productivos	Aislamiento de poblaciones.

3.3. Tipos de erosión hídrica

Atendiendo a la forma como tiene lugar la erosión, cabe distinguir los siguientes procesos de erosión hídrica, los cuales se discuten a continuación:

- salpicadura (rainplash/splash erosion),
- erosión laminar (interrill erosion, sheet erosion),
- erosión por surcos (rill erosion),
- en cárcavas (gully erosion),
- erosión por remoción o movimientos en masa (mass movement) y
- erosión de cursos permanentes (streambank erosion).

3.3.1. Erosión por salpicadura

Se debe al impacto de las gotas de lluvia sobre los agregados de un suelo desnudo. Se producen pequeños cráteres de impacto, con liberación de partículas, que se desplazan en un radio máximo de 150 cm, siendo las arenas finas las más afectadas. Puede dar origen a un sello o costra superficial que influirá negativamente en las velocidades iniciales de infiltración (Figura 3.3).

Se relaciona directamente con la intensidad de la lluvia y su energía cinética (Tabla 3.1), e inversamente con la estabilidad de los agregados superficiales y la cobertura de residuos o canopeo. La presencia de vegetación arbórea puede incrementar este tipo de erosión por la formación de gotas más grandes a partir del flujo de hojas (Morgan y Rickson, 1995).





Figura 3.3: Manifestaciones de erosión por salpicadura (SECYOT-UNRC)

3.3.2. Erosión laminar

Es una forma de erosión superficial que se produce por acción del escurrimiento, perdiéndose una fina y uniforme capa de toda la superficie del suelo en forma de lámina (Figura 3.4). Algunos autores denominan sheet erosion a la combinación de erosión por salpicadura y erosión laminar (Troeh *et al*., 1991), mientras que otros denominan a esta combinación como interrill erosion (Fangmeier *et al*., 2006).

Este proceso produce una mayor pérdida neta de suelo que la erosión por salpicadura (Tabla 3.1), siendo el tamaño de partículas más afectado el que se desprende debido a la energía de la lluvia. Algunos autores postulan que el flujo laminar no existe, y que en realidad son flujos turbulentos poco perceptibles, que van organizándose e incrementando su potencial erosivo a medida que se incrementa la velocidad del escurrimiento (Morgan, 1995).

Es un tipo de erosión poco perceptible por el productor, no obstante es una importante vía de pérdida de suelo en condiciones de baja pendiente y suelos con infiltración disminuida.





Figura 3.4: Manifestaciones de erosión laminar (SECYOT-UNRC)

La ecuación básica que describe este tipo de erosión fue propuesta por Watson y Laflen, (1986) citado por Fangmeier *et al*. (2006):

$$D_i = K_i \times i^2 \times S_f$$

Donde:
D_i = Tasa de erosión laminar en kg/m^2-s,
K_i= Erodabilidad del suelo para erosión laminar en kg-s/m^4,
i = Intensidad de la lluvia en m/s,
$Sf = factor\ de\ pendiente = 1{,}05 - [0{,}85 \times exp(-4 \times sen\theta)]$
siendo θ = pendiente en grados.

3.3.3. Erosión por surcos

Conforme se incrementan los caudales, la altura del agua y su velocidad, se pasa de un flujo de tipo laminar a uno concentrado, definido por la microtopografía del lote. Este tipo de escorrentía concentrada tiene una mayor capacidad de desprendimiento y de transporte que el flujo laminar, con lo cual las tasas de erosión por este mecanismo se incrementan, pasando el flujo de tipo subcrítico a supercrítico. Suele denominarse a la erosión en surcos como aquella que el productor puede “borrar” con los implementos de labranza (Figura 3.5), luego de que ocurre, definición que intenta clarificar la diferencia entre erosión en surcos y en cárcavas.





Figura 3.5: Manifestaciones de erosión en surcos (SECYOT-UNRC)

El mecanismo de erosión en surcos requiere la formación de una pequeña “cabecera” que produce una erosión retrocedente (en sentido contrario al flujo). La velocidad de avance del surco depende de la cohesividad del material de suelo, la altura del salto de agua en la cabecera del surco y el caudal y velocidad del flujo.

La erosión en surco es la predominante en la mayor parte de los suelos. Es una función de la fuerza de corte del escurrimiento concentrado en surcos ζ y de dos propiedades del suelo: la erodabilidad del suelo para erosión en surcos Kr, y la resistencia al corte crítica del suelo ζ_c es decir aquella resistencia del suelo debajo de la cual el desprendimiento es despreciable. De acuerdo a esta relación, sólo habrá erosión si la fuerza de corte del escurrimiento ζ supera a la resistencia al corte crítica del suelo ζ_c. La relación entre estas variables se indica en la siguiente expresión (Fangmeier *et al*., 2006):

$$Dr = Kr \times (\zeta - \zeta c) \times \left(1 - \frac{Qs}{Tc}\right)$$

Donde:
Dr = Tasa de erosión en surcos en kg/m^2-s,
Kr = erodabilidad del suelo para erosión en surcos en s/m,
ζ_c = resistencia al corte crítica, debajo de la cual no hay desprendimiento en Pa,
Qs= contenido de sedimentos en el flujo de escorrentía por surcos en kg/m-s,

Tc = capacidad de transporte de sedimentos en los surcos en kg/m-s,
ζ = fuerza de corte hidráulica del escurrimiento en $Pa = \rho \times g \times r \times s$

siendo:
ρ = densidad del agua en kg/m^3
g = aceleración de la gravedad en m/s^2
r = radio hidráulico del surco en m (Ver concepto de radio hidráulico en Capitulo 6)
s = gradiente hidráulico del flujo en surcos (similar a la pendiente del terreno).

El término 1-Qs/Tc indica que cuando el contenido de sedimentos en el flujo Qs es igual a la capacidad de transporte Tc, el flujo está saturado y la erosión se hace cero, inversamente cuando el contenido de sedimentos en el flujo es bajo (“agua clara”) la capacidad de erosión es máxima.

3.3.4. Erosión en cárcavas

Las cárcavas (también llamadas barrancas, o simplemente zanjas) son la manifestación más visible y llamativa del proceso erosivo. Se desarrollan a partir de la acción del escurrimiento sobre la superficie, luego de que se alcanza un cierto caudal y velocidad del flujo, y se considera una cárcava como aquella forma de erosión que no puede ser borrada por las labranzas (Figura 3.6).





Figura 3.6: Manifestaciones de erosión en cárcavas (SECYOT-UNRC)

La tasa de erosión en cárcavas depende del potencial de generación de escurrimiento de la cuenca, del área de drenaje que recibe la cárcava, del material del suelo y subsuelo, de la forma que toma la sección y de la pendiente del terreno (Fangmeier *et al*., 2006).

La forma y profundidad que adoptan las cárcavas está determinada por el tipo de material del suelo y su grado de cohesión. Para materiales poco cohesivos, la forma tiende a ser en “u”, mientras que para materiales más resistentes la forma típica es en “v”. Frecuentemente el piso de la cárcava asienta sobre mantos de tosca calcárea cementados, retardando su avance en profundidad y dificultando la estabilización mediante vegetación.

La evolución de las cárcavas comienza con un pequeño salto hidráulico, que puede generarse en un quiebre de pendiente, y que produce una cabecera de corte o cabecera que avanza en forma retrocedente, es decir en dirección contraria al escurrimiento. Esto ocurre debido a la formación de una cascada o salto de agua que va erosionando el piso de caída del agua, y generando un debilitamiento del subsuelo por salpicadura, y una reducción de la resistencia al corte de la masa por

humedecimiento. En estas condiciones se producen caídas de bloques en la cabecera que va produciendo el avance retrocedente.

Las cárcavas avanzan siguiendo un ciclo de retroalimentación positiva, ya que la altura del salto de cabecera es cada vez mayor, lo cual genera una mayor energía cinética de la cascada que incrementa adicionalmente su poder erosivo. Por otra parte las cárcavas se van ramificando por toda la red de drenaje colectora, generando una red de cárcavas digitada que genera tantas cabeceras activas como vías de drenaje tenga la cuenca.

Las cárcavas pueden estar activas, cuando la cabecera avanza y el fondo (o piso) de la cárcava genera nuevas cabeceras internas, o inactivas cuando tanto la cabecera como el piso están vegetados.

Para las condiciones del Oeste de Córdoba, la erosión en cárcavas, junto a la de ríos y arroyos, es la fuente principal de generación de sedimentos en las cuencas (Cisneros, 2010).

La ciencia ha desarrollado algunos modelos de predicción de la erosión en cárcavas (Kirby y Morgan, 1994). La expresión siguiente considera el tamaño de la cuenca y la precipitación mínima como factores que regulan el avance de las cárcavas (SCS, 1966, citado por Kirby y Morgan, 1994):

$$R = (5.25 \times 10^{-3}) \times A^{0.46} \times P^{0.2}$$

Donde:

R = avance promedio anual de la cabecera en m

A = área de desagüe de la cuenca por encima de la cabecera en m^2 y

P = precipitación total de lluvias de 24 horas igual o mayor a 12,7 mm para un período determinado, convertida a una base anual promedio en mm.

Utilizando este procedimiento para una cuenca representativa de las condiciones del sur de Córdoba, se estimaron avances promedio del orden de 28 m/año, con máximos de 80 y mínimos de 6 m/año (Cisneros *et al*., 2005). Para la misma región y utilizando otros procedimientos, se estimó un avance anual promedio del orden de 11 m/año con máximos de 17 para la cuenca La Colacha (Dpto. Río Cuarto, Córdoba), y mínimos de 3 para la cuenca de San Ambrosio (Cisneros, 2010).

Este tipo de erosión es el más reconocido por los productores agropecuarios, ya que implica daños muy visibles en sus tierras y, especialmente, en los caminos rurales que funcionan como vías preferenciales de circulación de escurrimientos, y por lo tanto, sufren en mayor medida los daños por este mecanismo de erosión. Mas detalles sobre el comportamiento de las cárcavas se discuten en el Capítulo 6.

3.3.5. Erosión por movimientos en masa

Implica el desplazamiento de grandes volúmenes de material en condiciones especiales de humedad, pendiente y tipo de suelo. Los movimientos en masa se producen frecuentemente en suelos someros, asentados sobre un material impermeable, como rocas graníticas, bajo fuertes pendientes. En estas condiciones el material “fluye” sobre la interfase suelo-roca por un efecto mecánico de disminución de la resistencia al corte, aumento del peso y lubricación del contacto entre ambas capas.

Las condiciones de manejo influyen además sobre este tipo de pérdida de suelo, en especial el desmonte de áreas en pendiente, con la consiguiente pérdida de propiedades mecánicas del sistema suelo-planta, (se discuten en el Capítulo 7) por falta de anclaje y reforzamiento del volumen de suelo por las raíces. El fuego y el sobrepastoreo son factores que inciden en la eliminación de la vegetación, y en la generación de escurrimientos, y, por lo tanto, en los riesgos de ocurrencia de estos fenómenos.

Este tipo de fenómeno ha dado lugar a eventos catastróficos en cuencas torrenciales de todo el mundo, en donde recibe variadas denominaciones: coladas de barro, flujos de lodo, desprendimientos de ladera, aluviones, remoción en masa, etc. La Tragedia de Armero en Colombia (1985), producida por la erupción de un volcán, provocó el derretimiento repentino de glaciares que se transformaron en coladas de barro sepultando a más de 20.000 personas en un evento de pocas horas.

En la región central de Argentina este fenómeno se puede visualizar en las zonas de sierra, y se generan por los mecanismos descriptos anteriormente (Figura 3.7).



Sierras de Córdoba (UNRC-SECYOT).



Armero, Colombia (J. Marso, geólogo del USGS).

Figura 3.7: Manifestaciones de erosión por movimientos en masa

3.3.6. Erosión de cursos permanentes

Los bordes y fondos de ríos y arroyos son las zonas de la cuenca más susceptibles a la erosión en virtud de su proximidad al cauce y a que deben soportar la máxima energía de las crecientes, ya que son los lugares de traslado y concentración de escurrimientos.

La erosión de márgenes se produce en el pie del río debido a la acción erosiva de la corriente que desestabiliza la base y produce el desmoronamiento del resto de la margen, en forma similar al mecanismo descripto para la erosión en cárcavas. Este mecanismo se da típicamente en los sectores cóncavos de meandros o curvas de ríos de llanura, y es responsable del avance (también llamado corrimiento de meandros) del meandro sobre otras tierras (Figura 3.8).

Es un fenómeno relacionado estrechamente a la eliminación de la vegetación de la zona de riberas de la mayor parte de los ríos de la región central de Argentina, causada por el avance de la frontera agrícola y la sobreexplotación del recurso forestal, arbustivo y herbáceo de los denominados bosques en galería. Otros aspectos que regulan la magnitud de este tipo de erosión son la presencia de materiales poco cohesivos en las márgenes y la frecuencia y caudal de las crecientes ocurridas en la cuenca de aporte.





Río Quinto, erosión de márgenes (UNRC-SECYOT)



Río Cuarto, erosión de márgenes (UNRC-SECYOT)

Figura 3.8: Manifestaciones de erosión de márgenes de cursos permanentes.

Un curso puede estar en equilibrio si el nivel medio de la margen y el fondo no varían; se está erosionando si este nivel disminuye, y se está sedimentando si aumenta. Otros tipos de erosión de los cursos son las siguientes (Pouey, 1998):

- Erosión transversal: se produce en todas aquellas secciones donde se reduce el ancho del río,
- Erosión en las curvas: consiste en la profundización del cauce en la zona cercana a la orilla cóncava (meandro)
- Erosión al pie de obras: se produce cuando el flujo rodea a alguna obra realizada en el lecho del río.
- Erosión local en estribos o al pie de obras unidas a la margen: similar a la anterior para obras en la margen.
- Erosión aguas abajo de presas: ocurren cuando se reduce la carga de sedimentos de la corriente por acción de las presas ("aguas claras").
- Erosión local aguas debajo de obras de desagüe: se producen al pie de obras de descarga desde la margen al río.
- Erosión aguas arriba de cortes de meandros y rectificaciones: se producen al alterar la forma de un meandro por canalización y rectificación, hay aumento de la pendiente de fondo, de la velocidad y de la carga de sedimentos, que puede incrementar la erosión de fondo aguas abajo de la obra.
- Erosión bajo tubería: se produce cuando se colocan tubos en el lecho del río.

La erosión de fondo de los cauces (disminución del nivel de base) es un fenómeno relacionado a la pérdida paulatina de material del lecho, a causa de los caudales erogados en la cuenca, a la carga de sedimentos y al tipo de material del fondo. Es un fenómeno que afecta a la mayoría de los cursos permanentes del centro argentino, en especial aquellos que han sufrido degradación biológica de sus márgenes o degradación de su estado geomórfico (Brierkley y Friyrs, 2005). Como ejemplo de este deterioro puede mencionarse la disminución del nivel de base del cauce del río Cuarto, del orden de 4 m, desde el año de construcción del puente carretero (1912), hasta la construcción del azud nivelador (2003), construidos con el objetivo de controlar la erosión de fondo, y proteger los pilares de dicho puente y el puente ferroviario (Figura 3.9)

Entre las principales causas antrópicas de la erosión de fondo de los cauces pueden citarse:

- Extracción de áridos (arena) del lecho,
- Construcción de embalses (“aguas claras”),
- Deforestación de márgenes,
- Rectificación de meandros.



Arroyo Las Lajas (UNRC-SECYOT)



Río Cuarto (UNRC-SECYOT)

Figura 3.9: Manifestaciones de erosión de fondo en cursos permanentes.

3.4. Modelos de estimación de la erosión. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS, Universal Soil Loss Equation, USLE)

Los métodos de estimación de la erosión son herramientas que permiten evaluar mediante un indicador cuantitativo el grado de erosión presente, y las posibilidades de control del proceso mediante un conjunto de técnicas de manejo. Los modelos pueden dar una estimación en términos absolutos, cuando representan adecuadamente lo que ocurre en la realidad, o relativo, cuando el interés de su uso está en las comparaciones entre situaciones, para ayudar a la toma de decisiones sobre el manejo.

Los modelos son simplificaciones de la realidad, que sirven para diferentes objetivos de acuerdo a los potenciales usuarios. El primer paso para el desarrollo de un modelo es establecer la estructura conceptual, o las principales relaciones causa-efecto en los procesos que se intenta modelizar. Identificados los componentes y sus relaciones, el modelo trata de establecer las funciones de respuesta de las variables en forma aislada o conjunta, en lo que podría llamarse la etapa de calibración del modelo, y en tercer lugar se evalúa la capacidad del modelo de representar adecuadamente la realidad, es decir la etapa de validación.

Desde el punto de vista de su concepción y su base de cálculo, los modelos de erosión pueden clasificarse en (Morgan, 1995): a) Modelos físicos: son modelos a escala (maquetas), desarrollados en laboratorio, que asumen una similitud entre el modelo y el mundo real. b) Modelos analógicos: usan analogías entre el modelo a simular y modelos mecánicos o eléctricos y c) Modelos digitales: basados en el uso de computadores para procesar grandes cantidades de datos.

Dentro de los modelos digitales existen dos tipos de modelos: los modelos de base física y los modelos empíricos. Los modelos de base física se desarrollan aplicando ecuaciones matemáticas que describen los procesos, con base en leyes fundamentales de la física, en este caso la ley de conservación de la masa y la energía y la ecuación de continuidad. El modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project, Nearing *et al*., 1989) es un modelo de este tipo.

Los modelos empíricos se desarrollan a partir de relaciones estadísticas entre procesos basadas en el tratamiento de grandes bases de datos. Los modelos empíricos pueden ser “de caja negra” en los cuales sólo se estudian relaciones entre entradas y salidas, “de caja gris”, cuando algunas relaciones entre procesos se conocen y “de caja traslúcida” cuando se dan detalles de cómo se relacionan las variables del modelo.

Un ejemplo de este último tipo de modelo es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS, también conocida como USLE, por sus siglas en inglés) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos, de la década del 50 del siglo pasado. Este modelo se desarrolla a partir de relaciones estadísticas desarrolladas a partir de una amplia base de datos experimental es de más de 8000 parcelas distribuidas en el territorio (Wischmeier y Smith, 1978), que combina diferentes condiciones climáticas, de suelo, pendiente y sistemas de uso y manejo del suelo. Es el método de uso más generalizado para la predicción de la pérdida promedio anual de suelo por erosión hídrica para una determinada rotación de cultivos.

Este modelo ha sido utilizado para estimar la erosión en la provincia de Córdoba por Cisneros *et al.* (2004), de Prada *et al*. (2008) y Marelli (2012).

A continuación se analizará la versión original del modelo, y al final de capítulo se analizan detalles y procedimientos de cálculo utilizando la última versión revisada del modelo, denominada RUSLE2.

La ecuación básica del modelo EUPS es la siguiente:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

en donde:

A= pérdida anual de suelo en t/ha/año;
R= factor de erosividad por la precipitación pluvial;
K= factor de erodabilidad del suelo;
L= factor de longitud de la pendiente;
S= factor de gradiente de pendiente;
C= factor de manejo de cosechas;
P= factor del método de control de erosión

Especial cuidado debe tenerse al manipular las unidades del modelo. Originalmente se desarrolló en unidades del sistema americano (kg fuerza, acre, pie, pulgada), aunque actualmente el sistema utilizado es el Internacional (t, mm, ha, Mj). En el Anexo I de este capítulo se expresan ambos sistemas de unidades y su respectiva conversión recíproca.

La ecuación se llama “universal” porque está exenta de algunas de las generalizaciones y restricciones geográficas y climáticas inherentes a los primeros modelos que se utilizaron para esta estimación. Si bien, los valores de los parámetros se presentaron para las condiciones de Estados Unidos, a medida que se generalizó su uso, la obtención de nuevos datos, permite su utilización en otras regiones, incluyendo las de otros continentes.

La EUPS puede utilizarse para (Kirby y Morgan, 1994):

- estimar la pérdida anual promedio de suelo de una pendiente, en un campo con condiciones específicas de uso y manejo de la tierra;

- apoyar la toma de decisiones en la selección de sistemas de uso y manejo, y de prácticas de conservación para condiciones específicas de suelos y pendientes;
- estimar el cambio en la pérdida de suelo que resultaría de un cambio en el uso o de las técnicas de conservación sobre una situación dada;
- determinar como pueden aplicarse o alternarse las prácticas de conservación para permitir un uso más intensivo de las tierra, manteniendo una pérdida de suelo tolerable;
- estimar las pérdidas de suelo en áreas con un uso de suelos distinto del agrícola;
- obtener estimaciones de pérdida de suelo para que los organismos ejecutivos responsables de la Conservación de Suelos determinen las necesidades de conservación (Capítulo 8).

Los factores de la ecuación se desarrollaron mediante una unidad de evaluación llamada parcela estándar; la misma posee una longitud de 22,13 m sobre una pendiente uniforme de 9 % en sentido longitudinal. La parcela fue laboreada a favor de la pendiente y estuvo bajo barbecho continuo durante por lo menos dos años. Esta parcela se tomó como base para definir la variación en L, S, C y P.

A continuación se discuten los términos de la ecuación EUPS.

3.4.1. Erosividad por la precipitación pluvial (R)

El factor R representa la erosividad de la precipitación pluvial, que se define como la capacidad potencial de la lluvia para provocar erosión. Es una función de dos características de las lluvias intensas: la energía cinética y la intensidad máxima durante 30 minutos.

A continuación se presenta la ecuación de regresión que describe la energía cinética de una lluvia:

$$E = 0.119 + 0.0873 \times log_{10} I$$

donde
E = energía cinética de la lluvia en Mj/ha-mm y
I = intensidad de la precipitación en mm/h.

El factor R se obtiene a través del producto de la Energía por la Intensidad horaria de una lluvia de duración igual a 30 minutos (EI_{30}), que es una medida de la manera en que se combinan estas variables y define los efectos conjuntos del impacto de las gotas de lluvia y la turbulencia de la escorrentía con el transporte de las partículas del suelo procedentes de un campo.

La intensidad de 30 minutos de la tormenta se calcula a través de los registros de los pluviógrafos, localizando en ellos la mayor cantidad de lluvia caída en 30 minutos y multiplicando esta cantidad por 2 para expresarla en forma de intensidad horaria.

Para la región pampeana se han investigado los valores de R (Rojas y Conde, 1985), cuyos valores oscilan entre 10000 Mj*mm/ha*h para el Norte de Misiones, y 3000 para el Oeste de Córdoba. En la Tabla 3.3 se indican valores de R para localidades de la provincia de Córdoba.

Tabla 3.3: Valores de erodabilidad de la lluvia (R) de localidades de Córdoba (Argentina).

Localidad	Erosividad R (Mj*mm/ha*h)
Córdoba	3000
Bell Ville	3900
Marcos Juárez	4700
Río Cuarto	3500

La estación experimental Paraná del INTA, cuenta con una aplicación web que permite la utilización de la ecuación USLE, para cada uno de los departamentos de la provincia (En http://inta.gob.ar/unidades/631000).

3.4.2. Erodabilidad del suelo (K)

La erodabilidad del suelo es su vulnerabilidad o susceptibilidad a la erosión, expresada en unidades de pérdida de suelo (t/ha) por cada punto de R (Mj*mm/ha*h). Este factor refleja el hecho de que diferentes suelos se erosionan a diferentes tasas cuando los demás factores que afectan a la erosión son los mismos. Como se discutió en el apartado 3.1. la susceptibilidad de un suelo a la erosión es mayor en texturas intermedias, en suelos con bajos tenores orgánicos, y con degradación estructural.

El factor K es función de cinco parámetros del suelo: porcentaje de limo más arena fina, porcentaje de arena, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad. Existen formas gráficas y aplicaciones web para obtener el parámetro K. En la Figura 3.10 se presenta el nomograma para la obtención de K, los valores obtenidos corresponden a unidades del sistema americano, que deben ser consistentes con el uso de unidades de R (Anexo I). La versión revisada de la USLE permite la estimación de K automáticamente (Ver apartado 3.5.)

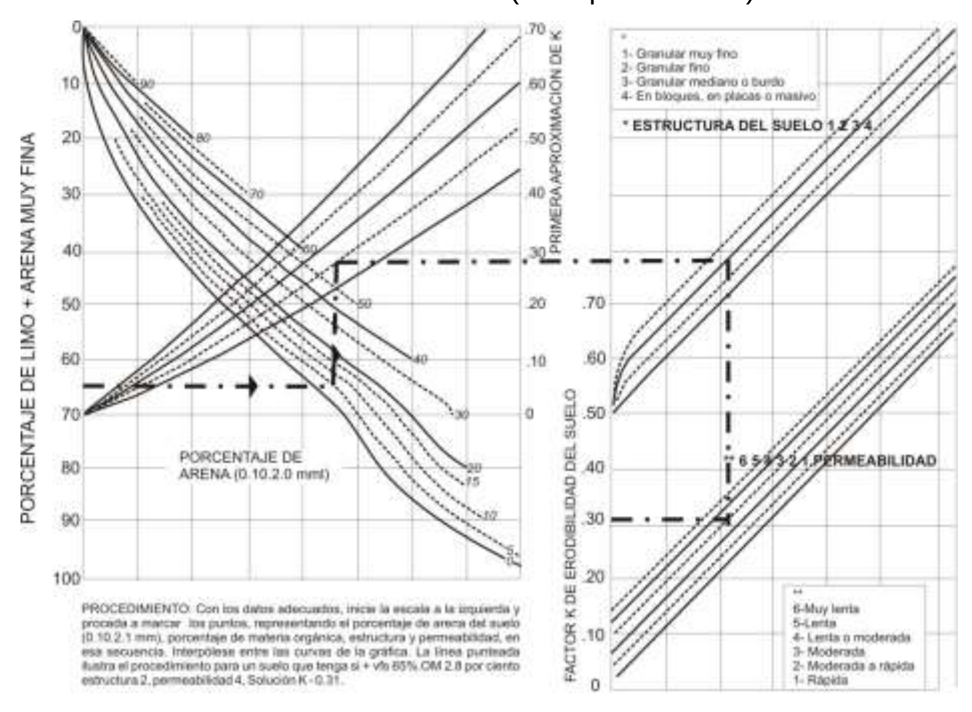


Figura 3.10: Nomograma para la obtención del factor K de la USLE.

3.4.3. Longitud (L) y gradiente de pendiente (S)

La longitud de la pendiente se define como la distancia desde el punto de origen del flujo sobre la superficie hasta el punto donde la pendiente disminuye lo bastante como para que ocurra la deposición o hasta el punto en el que el escurrimiento entra en un canal definido. El gradiente de pendiente se expresa en porcentaje (diferencia de cota en 100 m de distancia horizontal). El método agrega ambos valores para la obtención del factor LS (Figura 3.11), de tipo adimensional.

El desarrollo de la EUPS se basó en la longitud de una parcela estándar de 22,13 m, y 9 % de pendiente, por lo tanto el factor de longitud de la pendiente se definió como:

$$L = \left(\frac{x}{22.13}\right)^m$$

Donde:

L= factor de longitud de pendiente;
x= longitud de la pendiente en m
m= coeficiente

Según:

m = 0,5 si la pendiente > 5 %
m = 0,4 si la pendiente < 5% y > 3%
m = 0,3 si la pendiente < 3% y > 1%
m = 0,2 si la pendiente < 1%

Las investigaciones determinaron que la pérdida de suelo estaba correlacionada también con una descripción parabólica del efecto de la inclinación de la pendiente o gradiente:

$$S = \frac{0.43 + 0.3 \times s + 0.043 \times s^2}{6.613}$$

En donde:
S = factor de gradiente de la pendiente;
s= gradiente de la pendiente [%]

Por lo tanto, los valores de LS pueden computarse a partir de la siguiente ecuación:

$$L \times S = \left(\frac{x}{22.13}\right)^m \times (0.065 + 0.045 \times s + 0.0065 \times s^2)$$

Ambas ecuaciones se encuentran resueltas gráficamente en la Figura 3.11. Obsérvese que el valor LS=1 coincide aproximadamente con la parcela estándar del SCS: 22,3 m y 9 % de gradiente. Situaciones con valores menores o mayores de L y S, darán como resultado menores y mayores valores del factor LS, respectivamente.

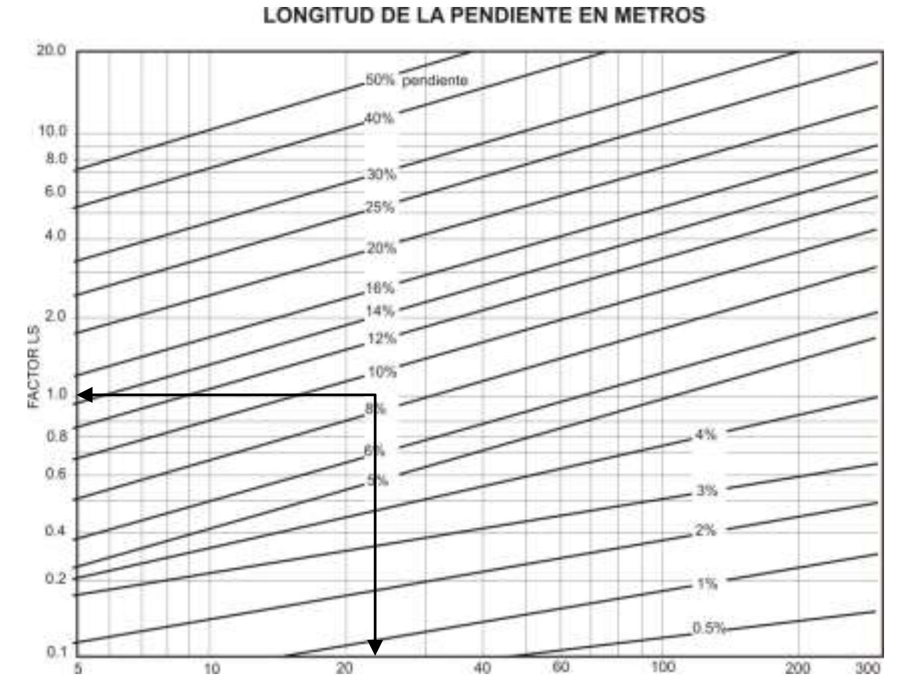


Figura 3.11: Factor de longitud y grado de pendiente, LS (Fuente USDA, Handbook 537).

3.4.4. Manejo de cultivos.

El factor de manejo de cultivos (C, adimensional) representa la relación de pérdida del suelo a partir de una condición específica de cultivo o cobertura, con la pérdida del suelo a partir de un estado de barbecho continuo para el mismo suelo, pendiente y precipitación pluvial. La condición de barbecho desnudo, laboreado a favor de la pendiente toma el valor C=1.

Este factor incluye los efectos interrelacionados de la cubierta de canopeo o rastrojos, la secuencia y tipo de cultivos, el nivel de productividad, la duración de la estación de crecimiento, las prácticas de cultivo, el manejo de residuos, los sistemas/operaciones de labranza. Cada una de las condiciones del suelo se distribuye anualmente y se integra con la erosividad de la lluvia, dando como resultado el factor C de la rotación establecida. Es el factor de mayor complejidad de estimación de la USLE, debido a las múltiples combinaciones de los sistemas de cultivo y de manejo.

En la Tabla 3.4. se indican algunos valores orientativos de C, para cultivos, usos y manejos tradicionales de la región central argentina. El procedimiento manual de cálculo del valor C está discutido en Kirby y Morgan (1994).

Tabla 3.4: Valores de C para diferentes cultivos, rotaciones y sistemas de labranza (Marelli *et al.*, 2012).

Cultivo – Secuencia	Sistema de labranza	
	Convencional	Siembra Directa
Barbecho desnudo, a favor de la pendiente	1	-
Trigo – Soja 2º	0,15	0,09
Soja 1ª – Trigo	0,49	0,07

Soja – Maíz	0.34	0,10
Soja - Soja	0,55	0,15
Girasol – Girasol	0,40	0,10
Maní	0,55	-
Sorgo – Soja	0,44	0,13
Campo natural	0,02	-
Gramíneas perennes	0,05	0,02
Pasturas alfalfa + gramíneas	0,05	0,02
Verdeo de invierno	0,15	0,09
Forestación artificial (Eucaliptos de 8 años)	0,006	-

3.4.5. Prácticas de control de la erosión (P)

El factor de prácticas de control de la erosión, es la proporción de la pérdida de suelo que se obtiene mediante alguna técnica de manejo del relieve (Capítulo 5), en comparación con la pérdida de suelo cuando se cultiva en laderas con 9% de pendiente, a favor de la pendiente.

Las prácticas de control de la erosión que se incluyen en este factor son: cultivos en contorno o curvas de nivel, cultivos en franjas a nivel y terrazas. Los valores del factor P para estos tres tipos de prácticas se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Factor del método de control de la erosión (P).

Pendiente del terreno (%)	Cultivo en contorno	Cultivos en franjas en contorno	Terrazas [(a)]
1-2	0,60	0,30	0,12
3-8	0,50	0,25	0,10
9-12	0,60	0,30	0,12
13-16	0,70	0,35	0,14
17-20	0,80	0,40	0,16
21-25	0,90	0,45	0,18

[(a)] este valor es para la predicción de la pérdida total fuera del campo. Si se desea realizar el cálculo para un intervalo entre terrazas, deberá utilizarse la distancia entre una y otra terraza para el factor L y el valor de cultivo en contorno para P.

Otro de los efectos más importantes de estas prácticas, además de la reducción en la pérdida de suelo, es en la retención de sedimentos en el campo, en especial en la porción superior de los bordes de las fajas de cultivo, o en los canales de las terrazas. Este efecto se cuantifica a través de la relación entre la pérdida de suelo unitaria y la cantidad de esa pérdida que sale del lote en consideración, y se denomina Tasa de Transporte de Sedimentos (Sediment Delivey Ratio, o SDR, por sus siglas en inglés). Esta tasa es un parámetro importante en los estudios sobre contaminación por sedimentos o agroquímicos transportados por los escurrimientos. Las nuevas versiones del programa (RUSLE2) discutidas a continuación, permiten estimar este parámetro.

3.4.6. Tolerancia a la pérdida de suelo.

En términos pragmáticos, la tolerancia de pérdida de suelo es la tasa máxima de erosión de suelo que permite que se sostenga un alto nivel de productividad. En relación a la génesis del suelo, una tasa de erosión tolerable sería aquella pérdida de suelo anual equivalente a la tasa de formación del mismo suelo.

No existe un acuerdo general en la bibliografía sobre cual es la tasa de erosión tolerable. Tradicionalmente se ha considerado esta pérdida fluctuando entre 4 a 20 t/ha/año (Kirby y Morgan, 1994), aunque otros autores proponen una pérdida menor: 2 a 10 t/ha/año (Troeh, *et al*., 1991), o 1-2 t/ha/año (Walter y Stutzel, 2009).

Este rango de variación depende de la génesis de los suelos, correspondiendo los valores mayores a los suelos profundos, de textura franca, moderadamente permeables y que tienen características del subsuelo favorables para el crecimiento de las plantas y los menores a los suelos con las características opuestas. Este valor se utiliza como una guía para la planificación en la conservación de suelos, y es usado en Estados Unidos como indicador de la adecuación de los usos y manejos aplicados a campo, para el otorgamiento de facilidades a los productores.

3.5. Estimación de la erosión hídrica: Introducción al manejo del modelo RUSLE2.

3.5.1. Introducción

En los apartados anteriores se discutieron las principales características del modelo USLE original, usado ampliamente para estimar la pérdida de suelos por erosión laminar y en surcos, a escala de lote. Las sucesivas revisiones del modelo dieron lugar al desarrollo de RUSLE 2, (Revised Universal Soil Loss Equation, versión 2). RUSLE2 estima pérdida de suelo, producción de sedimento y características del sedimento proveniente de la erosión originada por las precipitaciones y el consecuente escurrimiento superficial. Para ello, utiliza factores que representan los efectos del clima (erosividad, precipitación y temperatura), erodabilidad del suelo, topografía, cobertura-manejo y prácticas de conservación de las tierras. Se trata de un modelo matemático que utiliza un sistema de ecuaciones implementado en un programa de computadora para estimar las tasas de erosión. Otro componente importante del mismo es la base de datos que contiene una gran matriz de valores que el usuario puede utilizar para describir una condición sitio-específica, de manera que RUSLE2 compute valores de erosión que reflejen las condiciones particulares de un sitio.

Este programa es usado para evaluar las tasas de erosión potencial en sitios específicos, guiar el planeamiento de la conservación y control de la erosión, inventariar las tasas de erosión sobre grandes áreas geográficas y estimar la producción de sedimentos en las tierras altas que pueden pasar a ser sedimentos en las cuencas.

RUSLE2 puede ser utilizado en cultivos extensivos, pasturas, ambientes naturales y todas aquellas áreas donde el suelo está expuesto al impacto de la gota de lluvia y al escurrimiento superficial producido cuando la intensidad de precipitación excede a la infiltración.

El objetivo de este capítulo es presentar el programa RUSLE2, explicar sus principales componentes y su funcionamiento a través de ejemplos, de modo de dotar al usuario de las habilidades básicas para operar con el programa. El programa completo en todas sus versiones, así como las bases conceptuales y métodos de la

simulación y manuales de usuario pueden ser descargados desde el sitio http://fargo.nserl.purdue.edu/rusle2_dataweb/RUSLE2_Index.htm

3.5.2. Bases de datos de suelo, clima y manejo de cultivos

Al ejecutarse la instalación de RUSLE2, se le da al usuario la opción de cargar las bases de datos de suelo, clima y manejo de cultivos que contiene el programa. Las mismas corresponden a las condiciones ambientales de Estados Unidos y por este motivo se mostrará como editar dichas bases de datos con información local que posea o estime el usuario si lo considera necesario.

3.5.3. Interfaz de usuario

Al abrir el programa se presenta una pantalla que consiste en una barra de herramientas en la parte superior y el escritorio de trabajo. Dentro de herramientas hay tres comandos fundamentales que se utilizan para trabajar en RUSLE2: Vista de descripción del plan, Vista de hoja de trabajo, Vista del perfil (Figura 3.12).

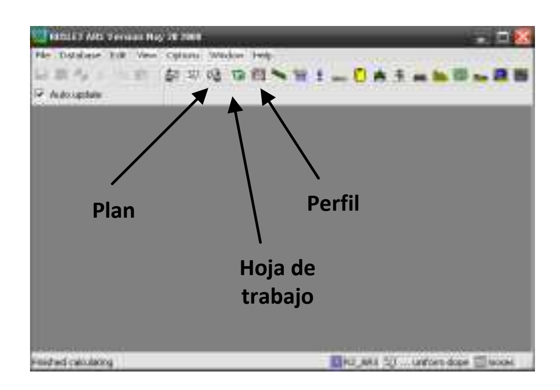


Figura 3.12: Pantalla de inicio de RUSLE2. En la parte superior se encuentra la barra de herramientas con los comandos Vista de descripción del plan, Vista de hoja de trabajo y Vista del perfil, y debajo el escritorio.

- Plan: Plantilla que se usa para calcular pérdida de suelo en múltiples campos para planes de conservación.
- Hoja de trabajo (Worksheet): Plantilla que se usa para calcular las pérdidas de suelo de diferentes situaciones para la misma pendiente o en un mismo campo.
- Perfil: Planilla utilizada para calcular la pérdida de suelo, asociada a una pendiente en un campo determinado. (Nótese que en este caso el término perfil no hace referencia a un perfil de suelo, sino a un corte transversal de un lote, donde se pueden indicar varias pendientes).

Para explicar el funcionamiento del programa utilizará una “hoja de trabajo” ya que las otras dos opciones trabajan de manera similar.

3.5.4. Creación de una plantilla “hoja de trabajo” (Worksheet)

Al abrir RUSLE2 se despliega una ventana denominada *Introduction* en la que debe escogerse la opción *Worksheet.* A continuación se desplegará la lista de hojas de trabajo guardadas hasta el momento y al optarse por alguna de ellas se desplegará en el escritorio la plantilla sobre la que se trabajará (Figura 3.13). Cabe aclarar que en RUSLE2 no se muestran plantillas en blanco sino que siempre debe escogerse una permitiéndole al usuario modificar los datos de la misma y guardarla con un nuevo nombre para que sea agregada a la base de datos.

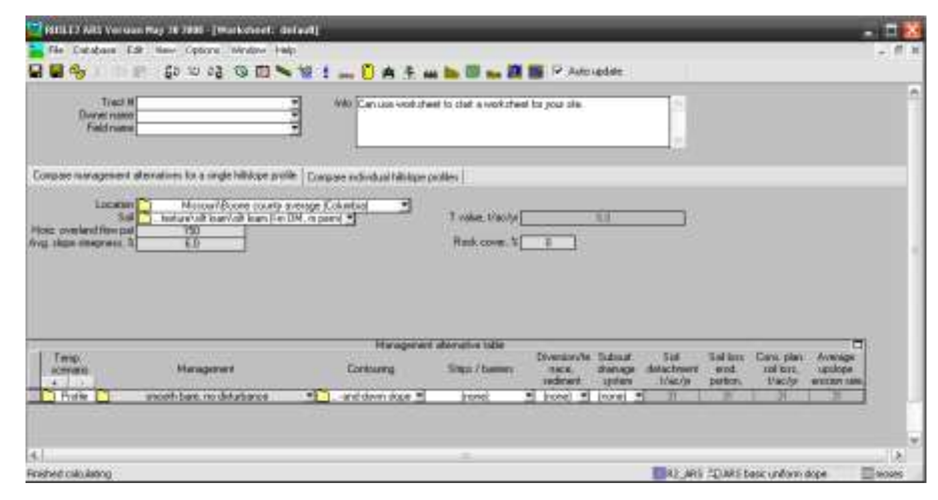


Figura 3.13: Plantilla Hoja de trabajo desplegada en el escritorio de RUSLE2

En caso de no haber escogido ninguna opción en la ventana *Introduction*, es posible abrir esta plantilla seleccionando el ícono correspondiente en la barra de herramientas.

Dentro de la hoja de trabajo se deberán escoger o crear las bases de datos correspondientes a Clima (Factor R de USLE), Suelo (Factor K), Topografía (Factor L y S), Cobertura-manejo (Factor C) y prácticas de conservación (Factor P) para que RUSLE2 pueda computar los valores de suelo desprendido (soil detachment) y pérdida de suelo por erosión fuera del lote (average upslope erosion rate). El suelo desprendido para el modelo representa aquella pérdida producida por erosión por salpicadura, laminar o en surcos que se remueve del lugar, pero que no necesariamente se perderá del lote considerado. La pérdida de suelo por erosión representa aquella porción que se pierde definitivamente del lote, y que es capaz de transformarse en sedimentos que afectarán a otros lugares de la cuenca. Cuando no existen prácticas de retención de sedimentos en el lote, como por ejemplo terrazas o fajas, ambos valores son similares, contrariamente cuando se modelan estas técnicas, los valores de pérdida de suelo son menores a los de suelo desprendido, por efecto de la captura de sedimentos que ejercen dichas prácticas.

Antes de comenzar a trabajar debe seleccionarse en la barra de herramientas *Options>Change all display units to>SI customary* para llevar todas las unidades al sistema internacional. Esto es muy importante ya que el modelo utiliza unidades relativamente complejas, y los valores difieren sustancialmente entre unidades del sistema internacional (t, h, mm, MJ, ha) y el sistema americano (acre, pie, pulgada) (Ver Anexo I de unidades).

3.5.5. Módulo Clima

Valores de erosividad, cantidad de precipitación pluvial y temperatura son los principales inputs de información que contiene este módulo. Para acceder al mismo puede

hacerse desde la carpeta *Location,* escogiendo una de las opciones en el cuadro de selección o bien seleccionando el ícono en la barra de herramientas. En el primer caso, se mostrará la información contenida en la base de datos climática seleccionada en el cuadro de selección y en el segundo caso se desplegará un listado de las bases de datos climáticas almacenadas de las que deberá escogerse alguna. Posteriormente se presentará una ventana donde pueden editarse los datos correspondientes a este módulo de acuerdo a las necesidades del usuario (información propia del sitio a simular) o puede utilizarse tal como está (Figura 3.14). A continuación se mostrarán los componentes del módulo climático y cómo editarlos.

Principios básicos

RUSLE2 se basa en la asunción de que el desprendimiento de suelo causado por una tormenta individual es directamente proporcional al producto entre la energía de la tormenta y su máxima intensidad en 30 minutos (denominado EI_{30}). La relación entre desprendimiento de suelo y erosividad de la tormenta es lineal, es decir que la erosividad de cada tormenta individual puede ser sumada para determinar valores mensuales y anuales de erosividad, parámetro denominado R (anual o por tormenta).

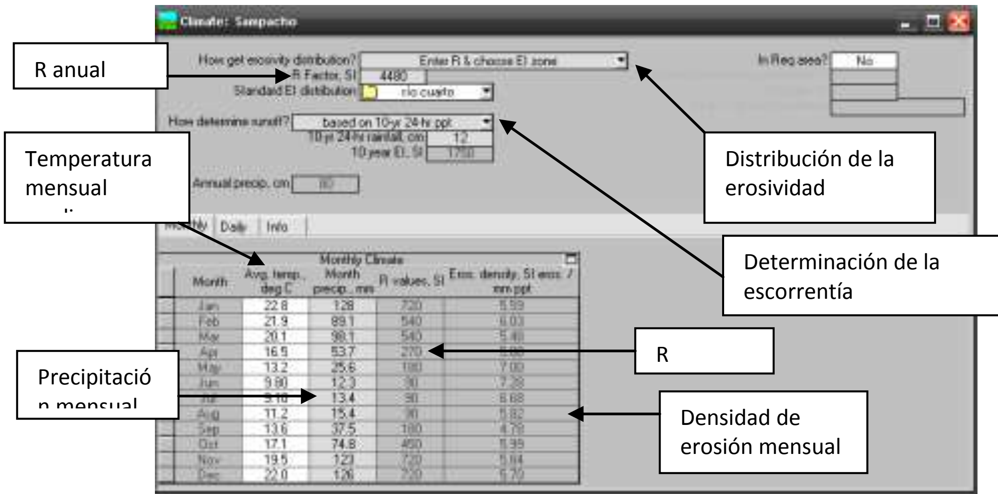


Figura 3.14: Ventana de edición del módulo Clima en RUSLE2.

Precipitación y temperatura

Dentro de la pestaña *Monthly,* se deben completar los datos de precipitación mensual (mm) y temperatura media mensual (°C) para la localidad seleccionada. Todos los datos que se encuentran dentro de la solapa *Daily* son computados automáticamente.

Erosividad (Factor R)

Existen tres maneras diferentes para determinar el valor R de erosividad y debe escogerse la adecuada en el cuadro de selección de *Distribución de la erosividad*.

- Enter R & choose EI zone: Cuando se escoge esta opción, debe ingresarse en el cuadro R anual la erosividad promedio anual para la zona de interés del usuario. El programa calcula automáticamente los valores mensuales de R de acuerdo a la precipitación. Si los valores de R están expresados en el sistema americano, deben multiplicarse por 17,02 para llevarlos al sistema internacional de unidades. Para las condiciones de la región pampeana estos valores pueden oscilar entre 3000 y 10000 Mj mm/ha h para los extremos oeste y este respectivamente.
- Enter monthly R values: Cuando se escoge esta opción deben ingresarse uno por uno los valores mensuales de R dentro de la solapa Monthly. En el cuadro R anual se presentará la resultante de la suma de todos los valores mensuales.
- From monthly eros. density & precip.: En este caso RUSLE2 calcula el parámetro R anual como la suma de los valores mensuales que a su vez surgen del producto entre la precipitación mensual ingresada y la densidad de erosión mensual. Los valores mensuales de densidad de la erosión son computados automáticamente como la razón entre precipitación (mm) y valores de R mensual.

En el cuadro de selección *In Req area?* debe escogerse la opción No.

Escorrentía

RUSLE2 utiliza tormentas con intervalos de recurrencia de 10 años para los cómputos de escorrentía como otro agente causal de la erosión. Para ello el programa provee dos alternativas de selección y debe escogerse una u otra en el cuadro de *Determinación de la escorrentía*.

- based on 10-yr 24-hr ppt: Esta alternativa hace referencia a la cantidad de precipitación (cm) que se produce en un período de 24 h y que tiene una probabilidad de ocurrencia de 1 vez cada 10 años. Esta información debe completarse en el cuadro que se encuentra inmediatamente debajo del de Método de estimación de la escorrentía. Para las condiciones del centro argentino pueden tomarse valores de 100 a 150 mm.
- based on 10-yr EI: Esta opción puede seleccionarse cuando se cuenta con información acerca de la erosividad de una tormenta con una recurrencia de 10 años. La información debe ser completada en el cuadro ubicado inmediatamente debajo del anterior.

Una vez finalizada la edición de todos los componentes del clima debe guardarse el modelo climático seleccionando el ícono en la barra de herramientas y escribiendo un nuevo nombre o sobrescribiendo uno ya existente en la ventana que se presenta. Por último, al cerrar la ventana del Módulo Climático se accederá nuevamente a la plantilla Hoja de Trabajo. Cada vez que se despliegue la ventana de opciones climáticas aparecerá el nuevo archivo creado en la base de datos.

3.5.6. Módulo Suelo

Valores de erodabilidad (Factor K), textura, grupo hidrológico (método de la curva número), cobertura rocosa, tiempo de consolidación y pérdida de suelo tolerable es la principal información que se debe ingresar en esta sección. Para acceder al módulo puede hacerse desde la carpeta *Soil*, escogiendo una de las opciones en el cuadro de selección o bien seleccionando el ícono en la barra de herramientas. En el primer caso, se mostrará

la información contenida en la base de datos de suelo seleccionada en el cuadro de selección y en el segundo caso se desplegará un listado de las bases de datos de suelos almacenadas de las que deberá escogerse alguna. Posteriormente se presentará una ventana donde pueden editarse los datos correspondientes a este módulo de acuerdo a las necesidades del usuario para sus propios suelos (Figura 3.15) o puede utilizarse tal como está. A continuación se mostrarán los componentes del módulo suelo y como editarlos.

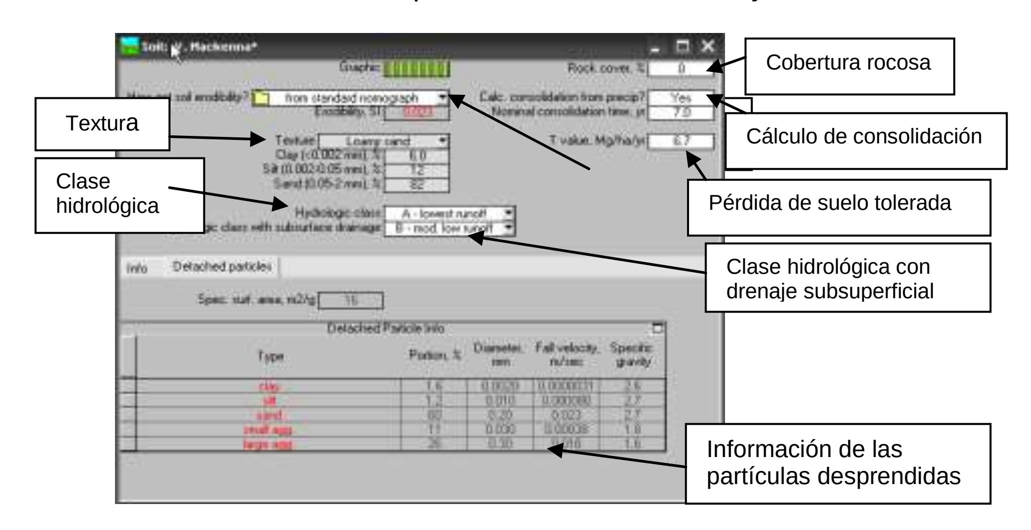


Figura 3.15: Ventana de edición del módulo Clima en RUSLE2.

Principios básicos

Los suelos varían en su susceptibilidad inherente a la erosión. La erodabilidad K de un suelo representa el efecto combinado de susceptibilidad del mismo al desprendimiento, transportabilidad del sedimento y la cantidad y tasa de escorrentía por unidad de erosividad de la lluvia. Suelos con alto contenido de arcilla o arena tienen bajo K por ser resistentes al desprendimiento en el primer caso y por el bajo escurrimiento los segundos. Los de textura media como los francos tienen K moderado por ser moderadamente susceptibles al desprendimiento e inducir moderada escorrentía. Suelos con muy alto contenido de limo son especialmente susceptibles a la erosión y tienen altos valores de K debido a que las partículas son fácilmente desprendidas, tienden al encostramiento con sus consecuentes grandes tasas de escorrentía y producen sedimento fino fácilmente transportable. La materia orgánica del suelo reduce el valor de K porque produce compuestos que mantienen unidas las partículas de suelo y aumentan su agregación, reduciendo su susceptibilidad al desprendimiento por el impacto de la gota de lluvia y el escurrimiento superficial. La permeabilidad del suelo afecta K porque incide en la escorrentía. La estructura del suelo también afecta los valores de K ya que influye sobre el desprendimiento y la infiltración.

Erodabilidad (Factor K)

RUSLE2 ofrece tres alternativas diferentes para determinar el valor de erodabilidad del suelo. En el cuadro de selección *Erodabilidad del suelo* debe escogerse la que el usuario considere más apropiada. Valores del orden de 0,02 a 0,05 t ha h/ha MJ mm, en unidades del sistema internacional, son comunes para los suelos de la región central argentina. Las unidades del sistema americano deben multiplicarse por 0,1317 para pasar al sistema internacional.

- set by user: En este caso el usuario debe ingresar el valor de K que considere correcto en el cuadro ubicado debajo del cuadro de selección.

- from standard nomograph: Al escoger esta opción RUSLE2 estima automáticamente el valor de erodabilidad para tierras de cultivo y suelos similares donde el perfil edáfico no fue disturbado. En este método de cálculo, el valor de K decrece según cambios en la estructura desde los bloques, pasando por masivo y por último granular. Esta opción debe escogerse para todos los suelos en producción agropecuaria.
- from mod. RUSLE2 nomograph: Esta alternativa debe ser utilizada para estimar la erodabilidad en suelos altamente disturbados como sitios de construcción, basureros y minas.

Textura del suelo

El programa utiliza los valores de las fracciones arena, limo y arcilla para computar la erodabilidad del suelo, la distribución por clases de las partículas de sedimentos que se desprenden y el diámetro de las menores y mayores clases de partículas en los agregados. Para ingresar los valores se puede escoger en el cuadro de selección *Textura* alguna de las opciones disponibles o bien pueden incorporarse manualmente los porcentajes correspondientes a cada una de las fracciones en los cuadros ubicados por debajo.

En la solapa *Detached Particles* se muestra un cuadro con las características de las partículas desprendidas que pasarán a formar parte del sedimento.

Cobertura rocosa

La cobertura rocosa del suelo actúa reduciendo la erosión al igual que los residuos de cultivos y el mulch con la diferencia de que las rocas no se descomponen ni agregan biomasa al suelo. RUSLE2 combina la cobertura de rocas con otro tipo de cobertura para obtener un valor único. El porcentaje de cobertura rocosa debe ingresarse el cuadro del mismo nombre.

Grupo hidrológico de suelo

El grupo hidrológico es un índice del potencial de escorrentía del suelo bajo determinadas condiciones (Ver método de la curva número). Existen cuatro grupos, desde A a D, incrementándose el potencial de escurrimiento en ese orden. Para cada suelo deben designarse dos grupos hidrológicos, uno para la condición sin drenaje y el otro para la condición con drenaje subsuperficial, debiendo seleccionarse el correspondiente a cada caso en los cuadros de selección *Clase hidrológica* y *Clase hidrológica con drenaje subsuperficial* respectivamente.

Tiempo de consolidación del suelo

El tiempo requerido para que se estabilice la tasa de erosión luego de un disturbio mecánico es lo que se designa como tiempo de consolidación del suelo. En este sentido RUSLE2 asume que el suelo es 2,2 veces más erodable inmediatamente después del disturbio que cuando ha comenzado a estabilizarse y determina que el tiempo de consolidación es de 7 años para precipitaciones promedio anuales que exceden los 760 mm. Para que el programa determine este parámetro, debe escogerse *Yes* en el cuadro de selección *Cálculo de consolidación.*

Pérdida de suelo tolerada

RUSLE2 permite establecer la tasa promedio de erosión anual (tonelada por hectárea por año) admitida para diferentes situaciones. El objetivo es reducir la erosión en un cierto porcentaje en relación a una situación base. Para ello, debe establecerse dicho valor en el cuadro Pérdida de suelo tolerada.

Una vez finalizada la edición de todos los componentes debe guardarse el modelo climático seleccionando el ícono en la barra de herramientas y escribiendo un nuevo nombre o sobrescribiendo uno ya existente en la ventana que se presenta. Por último, cerrar la ventana del Módulo Climático y se accederá nuevamente a la plantilla Hoja de Trabajo.

3.5.7. Módulo Topografía (Factores L y S)

Los valores de longitud (L, en m)) y gradiente (S, en %) de la pendiente deben ser ingresados en la Hoja de trabajo en los cuadros que se indican en la Figura 3.16. El método permite el cálculo de erosión con una longitud máxima de 300 m.

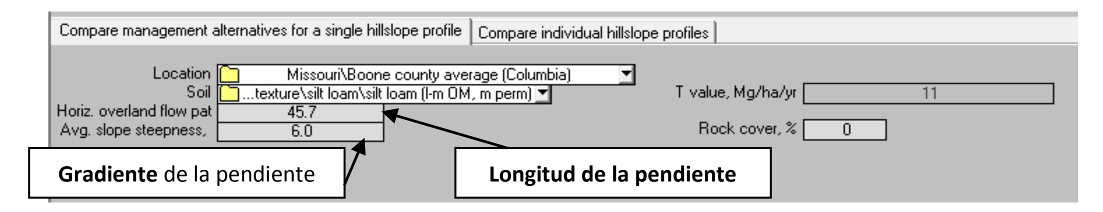


Figura 3.16: Hoja de trabajo de RUSLE2 donde se indican los cuadros correspondientes para el ingreso de los valores longitud (L, en m) y gradiente (S, en %) de la pendiente del terreno.

Principios básicos

La topografía forma parte de una descripción general del flujo superficial que incluye además al módulo cobertura-manejo y al suelo. Es decir que para los cálculos de volumen de escurrimiento, RUSLE2 tiene en cuenta los factores L, S y C

3.5.8. Módulo Cobertura-Manejo (Factor C)

Este módulo se refiere a cómo la vegetación, condición del suelo y el material que se encuentra sobre y en el interior del suelo afectan a la erosión. Las variables básicas utilizadas por RUSLE2 dentro de cobertura-manejo son canopia (material vegetal que no está en contacto con la superficie del suelo), cobertura superficial del suelo, rugosidad de la cobertura del suelo, altura de la rugosidad, biomasa dentro del suelo (raíces vivas y muertas y material incorporado), consolidación del suelo y antecedentes de humedad edáfica. Para editar este módulo debe seleccionarse una de las carpetas dentro de la columna *Manejo* en el cuadro *Management alternative table* que se encuentra en la Hoja de trabajo (Figura 3.17). También puede realizarse escogiendo una de las opciones en los cuadros de selección o bien seleccionando el ícono en la barra de herramientas.

.

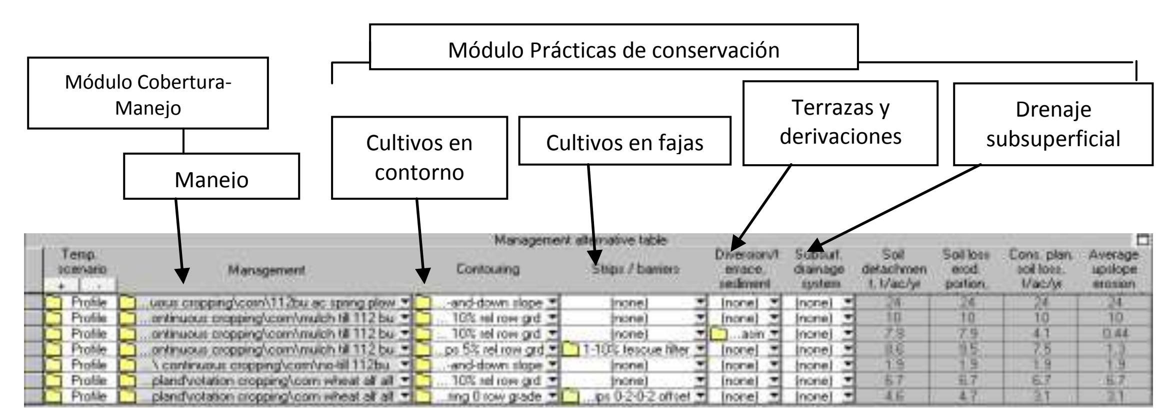


Figura 2.17: Cuadro *Management alternative table* que se encuentra en la hoja de trabajo en RUSLE2. En el mismo se muestran las carpetas para la edición del módulo cobertura-manejo y prácticas de conservación o sistematización.

Al seleccionar dicha opción se abrirá la ventana *Management* donde deberán editarse todos los parámetros correspondientes a este módulo (Figura 3.18).

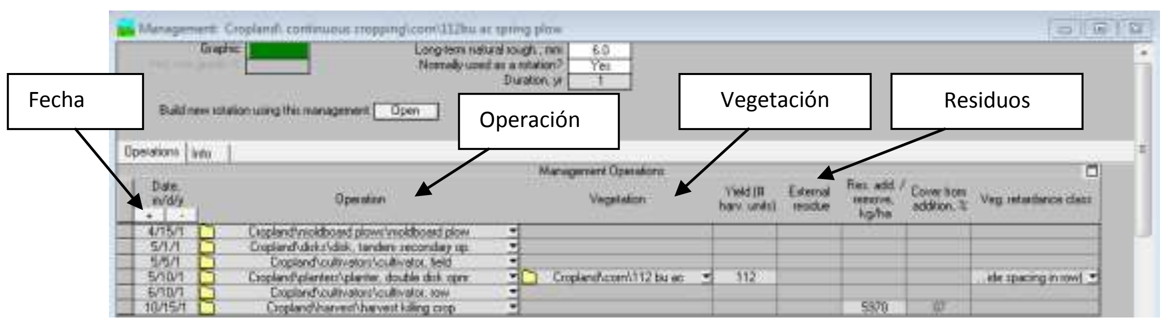


Figura 3.18: Ventana *Management* dentro del módulo cobertura-manejo de RUSLE2 donde se deberán editar todos los componentes de dicho módulo.

El primer paso para crear una descripción de Cobertura-manejo en RUSLE2 es listar las operaciones, es decir las fechas y eventos que afectan el suelo, la vegetación y/o los residuos. El segundo paso es incorporar la información de apoyo requerida como la descripción de la vegetación y el residuo externo y las tasas de aplicación de ese residuo. Una descripción de cobertura-manejo puede tener tantas operaciones y descripciones de vegetación como se requiera.

Fechas

Las operaciones son eventos discretos que ocurren en un día en particular y más de una puede ocurrir en un mismo día. Para definir las fechas de cada operación es necesario ingresarlas en la columna Fecha en la ventana Management.

Operaciones

Las operaciones son eventos que afectan el suelo, la vegetación y/o el residuo y RUSLE2 utiliza la información para calcular como afectan a la erosión. Para editar este componente debe seleccionarse una de las carpetas dentro de la columna *Operación* en la ventana *Management.* También puede realizarse escogiendo una de las opciones en los cuadros de selección o bien seleccionando el ícono en la barra de herramientas. Posteriormente se desplegará la ventana *Operation* donde deben completarse la información correspondiente (Figura 3.19).

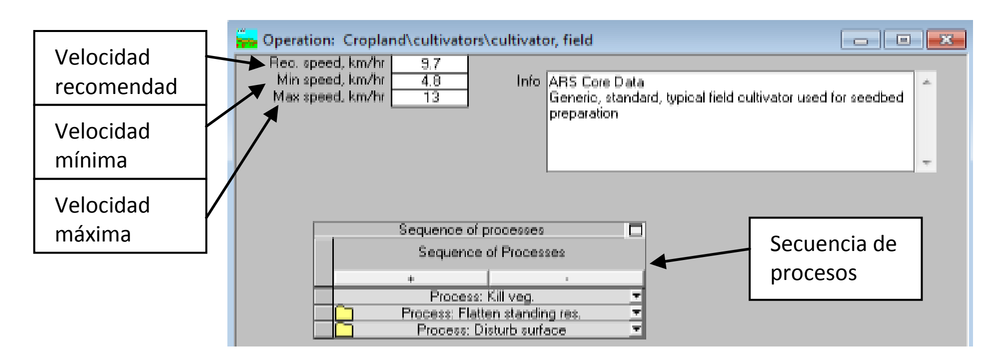


Figura 3.19: Ventana *Operation* dentro del módulo cobertura-manejo de RUSLE2, donde se editan las características de cada operación realizada.

Velocidad de trabajo

Velocidad recomendada, mínima y máxima: En estas opciones debe completarse la velocidad (km/h) a la que se recomienda realizar una operación dada y los valores mínimos y máximos admitidos para la misma.

Secuencia de procesos

Un conjunto de procesos se usa para describir cada operación. Los mismos deben ser ingresados en el orden correcto para tener el efecto deseado. Para realizarlo, dirigirse al cuadro *Secuencia de procesos* y escoger en cada cuadro de selección las diferentes procesos en orden descendente. Se pueden agregar tantos procesos como se requiera, haciendo clic derecho en un cuadro de selección y luego Add new row. A continuación se muestran los procesos de los que dispone el programa:

- No effect: El proceso no tiene efecto. Habitualmente usado para generar que RUSLE2 muestre información de una determinada fecha.
- Begin growth: Identifica comienzo de crecimiento de la vegetación.
- Kill vegetation: Convierte la biomasa viva sobre y debajo de la superficie del suelo en biomasa muerta que entra en proceso de descomposición.
- Flatten standing residue: Transfiere biomasa desde el pool residuo en pie hacia el pool de residuo sobre la superficie del suelo, simulando el aplastado del mismo. No afecta a las raíces vivas. Al seleccionar la carpeta correspondiente se abre un recuadro donde pueden ingresarse las tasas de aplastado para los diferentes materiales.
- Disturb surface: Representa un disturbio mecánico del suelo. Crea rugosidad, entierra y desentierra residuos y redistribuye ese material enterrado y las raíces muertas en el suelo. No afecta a las raíces vivas. Al seleccionar la carpeta correspondiente se abre una ventana donde deben escogerse el tipo, intensidad y profundidad de labranza, rugosidad inicial y final, superficie afectada por el proceso y tasa de enterramiento de residuos.
- Live biomass removed: Quita parte de la biomasa viva sobre la superficie del suelo sin matar la vegetación actual. Al seleccionar la carpeta correspondiente se abre una ventana donde deben ingresarse los porcentajes de biomasa total y superficie afectada.
- Remove residue/cover: Remueve la biomasa muerta y otros materiales desde la superficie del suelo. Al seleccionar la carpeta correspondiente abre una ventana donde deben ingresarse los porcentajes de residuo en pie y aplastado a remover.
- Add other cover: Adiciona residuo externo (mulch, estiércol, etc) a la superficie del suelo. Al seleccionar la carpeta correspondiente se abre una ventana donde debe ingresarse el porcentaje de superficie del suelo que se afectará con esta práctica.

- Add non-erod. Cover: Adiciona cobertura no erodable, p.e. plástico. Al seleccionar la carpeta correspondiente se abre un recuadro donde pueden ingresarse los porcentajes de cobertura y permeabilidad del material adicionado.
- Remove non-erod. Cover: Remueve la cobertura no erosionable. Al seleccionar la carpeta correspondiente se abre un recuadro donde pueden ingresarse los porcentajes de cobertura a remover.

Una vez finalizada la edición de todos los componentes deben guardarse los cambios realizados en *Operation* seleccionando el ícono en la barra de herramientas y escribiendo un nuevo nombre o sobrescribiendo uno ya existente en la ventana que se presenta. Por último, cerrar la ventana *Operation* y se accederá nuevamente a *Management*.

Vegetación

La descripción de la vegetación provee a RUSLE2 la información necesaria para computar la erosión en y entre surcos. El programa no tiene en cuenta toda la biomasa producida por la vegetación sino aquella que afecta la erosión. En este sentido, el rendimiento solo es importante para determinar los valores correspondientes a la variable biomasa utilizada en los cómputos. Para editar este componente debe seleccionarse una de las carpetas dentro de la columna *Vegetación* en la ventana *Management.* También puede realizarse escogiendo una de las opciones en los cuadros de selección o bien seleccionando el ícono en la barra de herramientas. Posteriormente se desplegará la ventana *Vegetation* donde deben completarse la información correspondiente (Figura 3.20).

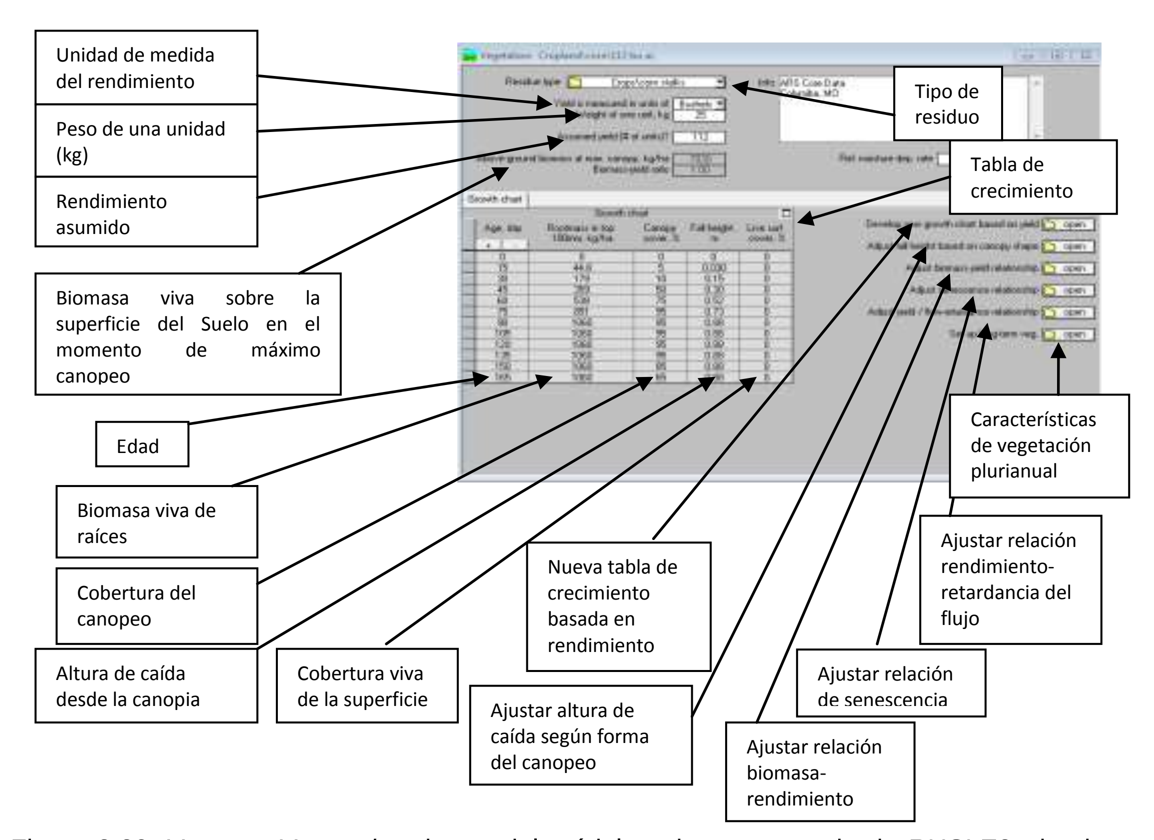


Figura 3.20: Ventana *Vegetation* dentro del módulo cobertura-manejo de RUSLE2, donde se edita la información descriptiva de la vegetación.

Rendimiento

Las variables de vegetación de RUSLE2 son función del nivel de producción (Rendimiento). Por lo tanto cada descripción de la vegetación es para un determinado rendimiento por lo que deben definirse la unidad de medida, el peso de la unidad (kg) y el rendimiento asumido para esa vegetación.

Biomasa viva sobre el suelo en el momento de máximo canopeo

RUSLE2 computa valores diarios para la biomasa viva sobre la superficie del suelo como una función de la cobertura del canopeo. Sólo aquellas partes de las plantas que pasarán a ser residuo ya sea en pie, sobre la superficie o incorporado son incluidas en este parámetro que se basa en la variación en el tiempo del porcentaje de canopeo representado en la tabla de crecimiento.

Tipo de Residuo

Aquí debe seleccionarse el tipo de residuo queda luego de la cosecha y es posible editarlo seleccionando la mayor o menor fragilidad del mismo ante las labores y la relación que produce entre cobertura y peso del mismo.

Tabla de crecimiento

La descripción de la vegetación incluye arreglos de valores para las variables temporales edad (tiempo), biomasa viva de raíces, cobertura del canopeo, altura efectiva de caída y cobertura viva sobre la superficie del suelo. El conjunto de estos valores es denominado tabla de crecimiento. Para cada “tiempo” en la tabla debe ingresarse un valor correspondiente a cada variable.

- Edad: Representa el tiempo en días comenzando desde el día cero, momento al que el programa referencia con la fecha designada para comienzo de crecimiento de la vegetación.
- Biomasa viva de raíces: En esta columna debe ingresarse el valor de biomasa viva (kg/ha) de raíces por unidad de área en el primer metro de suelo para cada día de la columna edad.
- Cobertura del canopeo: Representa el porcentaje de superficie del suelo cubierto por material de la planta para cada día de la columna edad.
- Altura de caída desde la canopia: Es la altura efectiva en metros desde la cual el agua de lluvia interceptada forma gotas que caen desde la canopia de la planta.
- Cobertura viva de la superficie: Es el porcentaje de vegetación viva que toca la superficie del suelo y afecta el impacto de la gota de lluvia y la escorrentía superficial.

Herramientas para desarrollar los parámetros de descripción de la vegetación

- Nueva tabla de crecimiento basada en rendimiento: Al seleccionar esta opción se abre una ventana en la que es posible generar una nueva tabla de crecimiento en la que se recalculan todas sus variables según el rendimiento asignado.
- Ajustar altura de caída según forma del canopeo: En este caso se abre una ventana en la que se debe editar la forma y densidad del canopeo según pasan los días lo que irá modificando la altura de caída desde la canopia.
- Ajustar relación biomasa-rendimiento: Con este comando se abre una ventana en la que se pueden establecer la relación entre rendimiento y biomasa producida en base seca para determinada vegetación.

- Ajustar relación de senescencia: Aquí deben determinarse el porcentaje de biomasa viva en el momento de máximo canopeo que llegará a senescencia (madurez) y el porcentaje de canopeo luego de completada la senescencia.
- Ajustar relación rendimiento-retardancia del flujo: La retardancia describe el grado en que la vegetación ralentiza el flujo superficial. Se presentará una ventana en la que se deben establecer espaciamiento entre surcos y retardancia esperada según prácticas de sistematización para determinados rindes.
- Características de vegetación plurianual: Esta herramienta se utiliza para establecer las características de la vegetación permanente. Es decir como varían todas las variables que utiliza RUSLE2 a lo largo de los años.

Una vez finalizada la edición de todos los componentes deben guardarse los cambios realizados en *Vegetation* seleccionando el ícono en la barra de herramientas y escribiendo un nuevo nombre o sobrescribiendo uno ya existente en la ventana que se presenta. Por último, cerrar la ventana *Vegetation* y se accederá nuevamente a *Management*.

Residuos

La descripción de los residuos debe incorporarse en la descripción de la vegetación y para todos los residuos externos. Los residuos correspondientes a la vegetación, hacen referencia al material remanente luego de que se mata la vegetación seleccionando el proceso *Kill vegetation,* e incluye hojas, tallos, semillas y raíces presentes en cantidad suficiente para afectar la erosión. En cambio los residuos externos son aquellos que fueron agregados al suelo a través del proceso *Add other cover,* e incluye mulch, estiércol, compost, acículas de pino, y otros materiales orgánicos que puedan entrar en proceso de descomposición.

Para editar este componente debe seleccionarse una de las carpetas dentro de la columna *Residuos* en la ventana *Management.* También puede realizarse escogiendo una de las opciones en los cuadros de selección o bien seleccionando el ícono en la barra de herramientas. Posteriormente se desplegará la ventana *Residue* donde debe establecerse la fragilidad ante un disturbio mecánico y el tamaño de partículas resultante, la tasa de descomposición en condiciones ambientales estándar, el tiempo necesario para la descomposición de la mitad de ese residuo en condiciones ambientales estándar y por último la relación biomasa-cobertura de suelo (Figura 3.21).

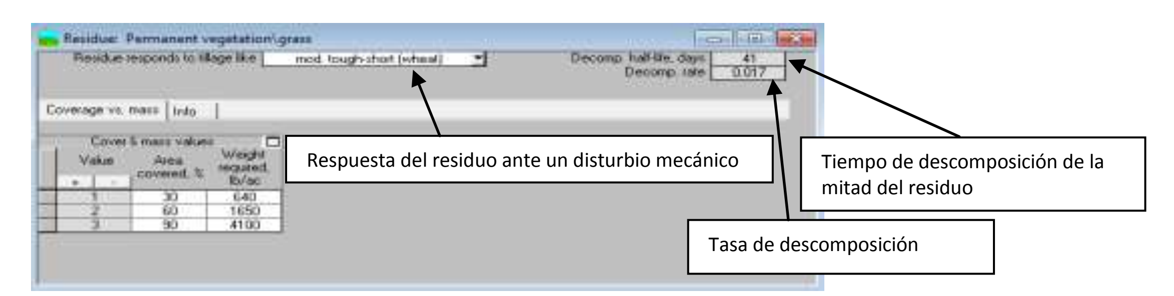


Figura 3.21: Ventana *Residue* dentro del módulo cobertura-manejo de RUSLE2.

Una vez finalizada la edición de todos los componentes deben guardarse los cambios realizados en *Residue* seleccionando el ícono en la barra de herramientas y escribiendo un nuevo nombre o sobrescribiendo uno ya existente en la ventana que se presenta. Por último, cerrar la ventana *Residue* y se accederá nuevamente a *Management*.

3.5.9. Módulo prácticas de conservación (Factor P)

Entre las prácticas de sistematización se incluyen: cultivos en curvas de nivel, fajas filtro y buffer de pastos, fajas de cultivos en rotación y terrazas de absorción y desagüe. Estas prácticas afectan la erosión reduciendo la erosividad de la escorrentía y la capacidad de transporte redireccionando el flujo, dividiendo el flujo superficial en tramos menores y disminuyendo la velocidad de la escorrentía.

Laboreo en Contorno

Se entiende por laboreo en contorno a la creación de surcos y microrelieve con equipo de labranza, máquinas de movimiento de tierra y otras operaciones que permiten redirigir y/o interceptar el flujo para evitar que corra a favor de la pendiente. Estos surcos o microrelieve pueden estar a nivel o tener alguna pendiente. Para editar este módulo debe seleccionarse una de las carpetas dentro de la columna *Cultivos en contorno* en el cuadro *Management alternative table* que se encuentra en la Hoja de trabajo. También puede realizarse escogiendo una de las opciones en los cuadros de selección o bien seleccionando el ícono en la barra de herramientas. A continuación se describen las alternativas que presenta RUSLE2. Todas ellas van asociadas a una pendiente relativa, entendiéndose a la misma como la relación existente entre la pendiente del laboreo y la pendiente del flujo superficial (la del terreno).

- Perfect contouring: Surcos y microrelieves se encuentran a nivel es decir su orientación es paralela a las curvas de nivel. Pendiente relativa es 0 %.
- Contouring with strips 5% rel row grade: Fajas de cultivos con pendiente relativa del 5%.
- Standard contouring 10 % rel row grade: Surcos y microrelieves con pendiente relativa del 10%.
- Cross slope-moderately off contour 25 % rel row grade: Surcos y microrelieves con pendiente relativa del 25%. Producen reducción de la erosión de manera significativa.
- Cross slope-half off contour 50 % rel row grade: Surcos y microrelieves con pendiente relativa del 50 %. No producen reducción de la erosión de manera significativa.
- Up and down slope: Surcos y microrelieves a favor de la pendiente. Pendiente relativa 100 %.

Para cada una de las alternativas mencionada se abrirá la ventana *Contour System* correspondiente en donde puede editarse el método de determinación de la pendiente de contorno (absoluta o relativa) y el valor que le corresponde (Figura 3.22).

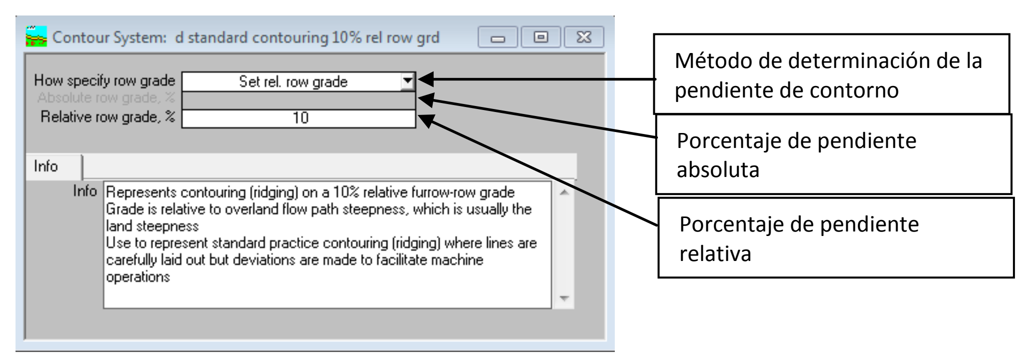


Figura 3.22: Ventana del editor *Contour System* de RUSLE2.

Una vez finalizada la edición de todos los componentes deben guardarse los cambios realizados en *Contour System* seleccionando el ícono en la barra de herramientas y escribiendo un nuevo nombre o sobrescribiendo uno ya existente en la ventana que se presenta. Por último, cerrar la ventana *Contour System* y se accederá nuevamente a la hoja de trabajo.

Barreras Porosas: Cultivos en fajas filtro o fajas buffer

Se denomina de esta manera a las prácticas que no cortan el flujo superficial ya que este pasa a través de las barreras. Éstas generan una alta retardancia del flujo disminuyendo la velocidad del escurrimiento y la capacidad de transporte de sedimentos. Para que las mismas sean efectivas deben ser implantadas a nivel. Ejemplos de barreras porosas son las fajas filtro (fajas de vegetación densa ubicadas al final del flujo superficial), fajas buffer (múltiples fajas angostas de vegetación densa permanente ubicadas a lo largo la pendiente) y fajas de cultivos en rotación (fajas de igual espesor que incluyen fajas de vegetación densa y cultivos alternados y espaciados a lo largo de la pendiente).

Para editar este componente debe seleccionarse una de las carpetas dentro de la columna *Barreras porosas* en la ventana el cuadro *Management alternative table* que se encuentra en la Hoja de trabajo. También puede realizarse escogiendo una de las opciones en los cuadros de selección o bien seleccionando el ícono en la barra de herramientas. Posteriormente se desplegará la ventana *Strip/Barriers* donde pueden editarse sus componentes (Figura 3.23). También está disponible la opción sin barreras porosas.

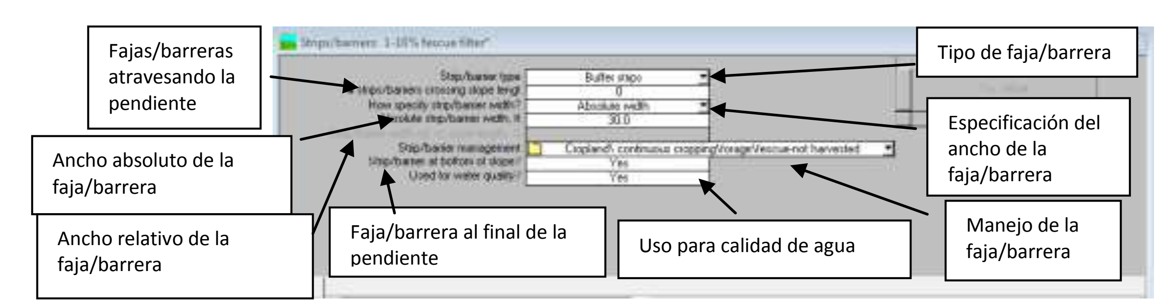


Figura 3.23: Ventana Strip/Barriers para editar los componentes de las barreras porosas.

- Tipo de faja/barrera: Aquí debe escogerse si se trata de fajas/barreras filtro, buffer o de cultivos en rotación. Dependiendo de qué opción se escoja aquí, se irán habilitando diferentes alternativas.
- Fajas/barreras atravesando la pendiente: Número de fajas/barreras asumiendo que las mismas se encuentran distribuidas de manera equidistante en la pendiente. Esta opción se activa para las fajas buffer y fajas de cultivos en rotación.
- Especificación del ancho de la faja/barrera: Se debe especificar si el ancho de las fajas/barreras se determina como valor absoluto o como porcentaje en relación a la longitud de la pendiente. Opción activa para fajas filtro y buffer.
- Ancho absoluto de la faja/barrera: Debe ingresarse en ancho en metros de la faja/barrera en caso de haber seleccionado la opción de valor absoluto en la alternativa anterior.
- Ancho relativo de la faja/barrera: Debe ingresarse el ancho de la faja/barrera como porcentaje en relación al largo total de la pendiente en caso de haber seleccionado la opción correspondiente para especificarla.

- Manejo de la faja/barrera: Aquí debe editarse el modulo cobertura-manejo correspondiente a la faja/barrera. Se abrirá la ventana Management en la que deben seleccionarse las características de Operación y Vegetación correspondiente. Opción activa para fajas filtro y buffer.
- Faja/barrera al final de la pendiente: Seleccionando la opción Yes se indica que se ubicará una faja/barrera en la parte inferior de la pendiente. Las demás fajas se encontrarán uniformemente espaciadas. Seleccionando No se indica que se ubicará la última faja/barrera a la misma distancia del final de la pendiente que el espaciamiento que tengan entre sí las demás fajas. Opción activa para fajas buffer.
- Uso para calidad de agua: Al seleccionar Yes, el programa determina que la última faja/barrera sea dos veces más ancha que las demás con el propósito de mejorar la calidad del agua, ya que produce retención de sedimentos y contaminantes (P en el suelo erosionado, por ejemplo). Opción activa para fajas buffer.

Una vez finalizada la edición de todos los componentes deben guardarse los cambios realizados en Strip/Barriers seleccionando el ícono en la barra de herramientas y escribiendo un nuevo nombre o sobrescribiendo uno ya existente en la ventana que se presenta. Por último, cerrar la ventana Strip/Barriers y se accederá nuevamente a la hoja de trabajo.

Interceptores de flujo: Derivaciones, terrazas y trampas de sedimentos

Los interceptores de flujo son estructuras que interceptan y frenan el flujo superficial pudiendo redireccionar el escurrimiento a través de canales de baja pendiente. Incluyen derivaciones, terrazas y trampas de sedimentos. Las terrazas son construidas con pendiente baja para causar la deposición de partículas o a nivel para conservar la humedad en climas secos. Las derivaciones son construidas con la suficiente pendiente para que no ocurra la deposición pero sin que se produzca erosión. Ambas estructuras incluyen albardones y canales.

Para editar este componente debe seleccionarse una de las carpetas dentro de la columna *Interceptores de flujo* en la ventana el cuadro *Management alternative table* que se encuentra en la Hoja de trabajo. También puede realizarse escogiendo una de las opciones en los cuadros de selección o bien seleccionando el ícono en la barra de herramientas. Posteriormente se desplegará la ventana *Channel/impoundment flow path system* donde pueden editarse sus componentes (Figura 3.24). También está disponible la opción sin canales interceptores de flujo.

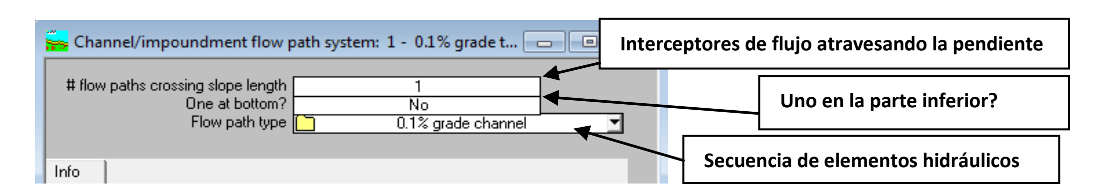


Figura 3.24: Ventana *Channel/impoundment flow path system* para editar las terrazas, derivaciones y cuencas de sedimentación.

- Interceptores de flujo atravesando la pendiente: Debe especificarse el número de interceptores de flujo que se dispondrán a lo largo de la pendiente.
- Uno en la parte inferior: Debe especificarse si se colocará o no (*Yes/No)* un interceptor de flujo en la parte inferior de la pendiente. Esto lo utiliza RUSLE2 para determinar la distancia entre cada estructura.

- Secuencia de elementos hidráulicos: Debe especificarse la secuencia de elementos hidráulicos (canales y reservorios) y si los mismos se encuentran a nivel o con pendiente.

Una vez finalizada la edición de todos los componentes deben guardarse los cambios realizados en *Channel/impoundment flow path system* seleccionando el ícono y escribiendo un nuevo nombre o sobrescribiendo uno ya existente en la ventana que se presenta. Por último, cerrar la ventana *Channel/impoundment flow path system* y se accederá nuevamente a la hoja de trabajo.

Drenaje subsuperficial

El drenaje subsuperficial reduce la erosión al disminuir la escorrentía superficial con el consecuente aumento en los niveles de producción de la vegetación.

Para editar este componente debe seleccionarse una de las carpetas dentro de la columna *Drenaje subsuperficial* en la ventana el cuadro *Management alternative table* que se encuentra en la Hoja de trabajo. También puede realizarse escogiendo una de las opciones en los cuadros de selección o bien seleccionando el ícono en la barra de herramientas. Posteriormente se desplegará la ventana *Subsurface drain. System* donde debe especificarse el porcentaje del área total que se encuentra afectada por drenaje subsuperficial. Tambièn está disponible la opción sin drenaje superficial.

Una vez finalizada la edición deben guardarse los cambios realizados en *Subsurface drain. System* seleccionando el ícono en la barra de herramientas y escribiendo un nuevo nombre o sobrescribiendo uno ya existente en la ventana que se presenta. Por último, cerrar la ventana *Subsurface drain. System* y se accederá nuevamente a la hoja de trabajo.

3.5.10. Expresión de resultados en RUSLE 2

Una vez editados los módulos Clima (R), Suelo (K), Topografía (L y S), Cobertura-Manejo (C) y Prácticas de conservación (P), pueden visualizarse los resultados computados por RUSLE2 en la ventana *Management alternative table* dentro de la hoja de trabajo (Figura 3.25).

- Desprendimiento de suelo (Soil detachment): Representa la erosión total del lote (Mg ha^{-1} $año^{-1}$), incluidas las áreas de deposición. Esto es, todo el suelo que se pierde de su lugar de origen y que puede quedar depositado en el propio lote.
- Pérdida de suelo de la parte erodable: Representa la producción total de sedimento (Mg ha^{-1} $año^{-1}$) excluidas las áreas de deposición.
- Pérdida de suelo para planes de conservación: Representa la cantidad de sedimento (Mg ha^{-1} $año^{-1}$) asociada a deposiciones remotas, entendiéndose por éstas a la deposición que ocurre en sitios alejados del punto de desprendimiento como ser en canales de terrazas o al pie de una pendiente cóncava.
- Erosión promedio pendiente arriba: Representa la pérdida de suelos que se transforma en sedimentos (Mg ha^{-1} $año^{-1}$) a partir del lote considerado, y que es derivada a un cauce de drenaje de orden mayor. Es un valor importante para estimar la carga de sedimentos que llevarán los ríos y arroyos producida por erosión laminar y en surcos. La relación entre el desprendimiento de suelo y la erosión promedio pendiente arriba es lo que se denomina relación de sedimento transportado (Sediment Delivery Ratio, SDR), muy utilizada para estimación de sedimentación en ríos y embalses y en estudios de contaminación de aguas superficiales.

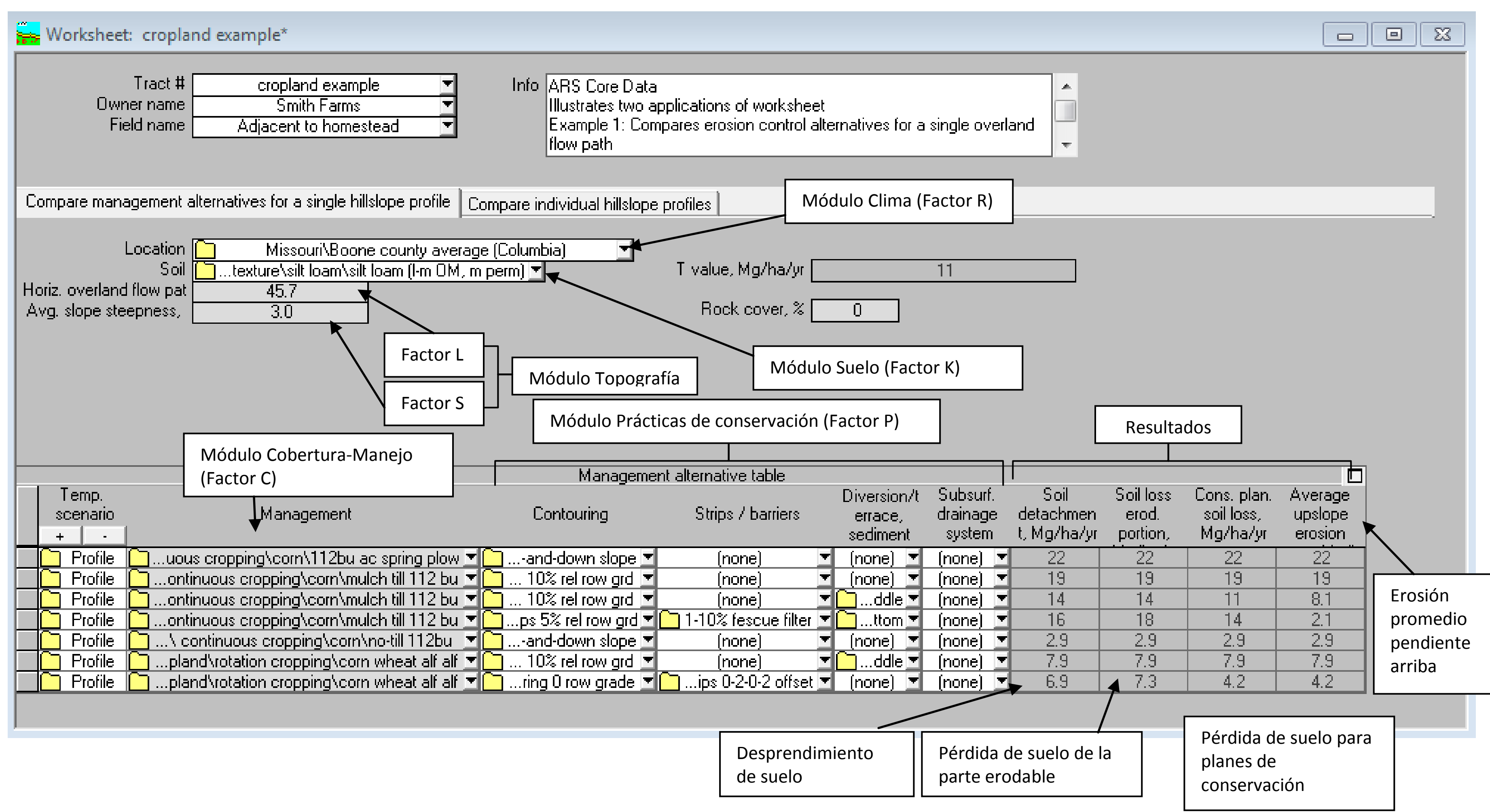


Figura 3.25: Hoja de trabajo donde se muestran los módulos de edición y los resultados computados por RUSLE2 en la ventana *Management alternative table.*

Bibliografía

Brierkley, G.J. y K.A. Fryirs. 2005. Geomorphology and river management. Applications of the river styles framework. Blackwell Publishing. 398 pp.

Cisneros, J.M. 2010. Bases para el ordenamiento territorial del sur de Córdoba (Argentina). El caso de la Cuenca de los Arroyos Menores. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Inédita.

Cisneros, J.M.; Cantero G. A.; Gonzalez, J.; De Prada, J.; Reynero, M.;. Gil, H.; Degioanni, A.; Cholaky, C.; Becerra, V.H. y F. Mongi. 2005. Identificación de los focos activos de erosión hídrica lineal y programa de control de erosión en la cuenca media y alta del arroyo Santa Catalina (arroyos La Barranquita, Cipión y La Colacha). Informe Final Protocolo Específico de Cooperación Dirección Provincial de Agua y Saneamiento (DIPAS) – UNRC/FAV. 20 pp. y anexos (catálogo de prácticas y cartográfico).

Cisneros, J.M.; De Prada, J.D.; Degioanni, A.; Cantero Gutiérrez, A.; Gil, H.; Reynero, M.A.; Shah, F. y B. Bravo Ureta. 2004. Erosión hídrica y cambio de uso de los suelos en Córdoba. Evaluación mediante el modelo RUSLE 2. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná (Entre Ríos). En Actas.

De Prada, J.D.; Lee T. C.;. Angeli A.R.; Cisneros J.M. y A. Cantero G. 2008. Análisis multicriterio para la conservación de suelos: Aplicación a una cuenca representativa del centro Argentino. REDIBEC (Revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica).15.

Fangmeier, D.D.; Elliot, W.J.; Workman, S.R.; Huffman, R.L. y G.O. Schwab.. 2006. Soil and Water Conservation Engineering. 5ª Edición. Thomson Delmar Learning. 502 pp.

Kirby, M. y L. Bracken. 2005. Modeling hillslope connectivity and channel interactions in semiarid areas: implications for hillslope restoration following land abandonment. En Batalla, R.J. and C. Garcia (Eds) Geomorphological processes and human impacts in river basins. IAHS Publication. 299 pp.

Kirby, M.J. y R.P.C. Morgan. 1994. Erosión de suelos. Limusa Noriega Editores. 375 pp.

Marelli, H. 2012. Estimación del potencial erosivo en la provincia de Córdoba a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE). Publicación INTA Marcos Juárez.

Meyer, L.D, and Wischmeier, W.H. 1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Transactions American Society Agricultural Engineers 12, 754-758, 762.

Morgan, R.P.C. 1995. Soil Erosion and Conservation. Second Edition. Longman Group Limited. 198 pp.

Morgan R.P.C. y R. J. Rickson, 1995. Slope Stabilization and Erosion Control- A Bioengineering Approach. E & FN SPON. Inglaterra. 274 pp.

Nearing, M.A.; Foster, G.R.; Lane, L.J. y S.C. Finkner. 1989. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. Transactions of the ASAE. 32:1587-93.

Pouey, N. 1998. Erosión hídrica en cursos de llanura sobre lechos cohesivos. UNR Editora. Rosario. 164 pp.

Rojas, A.E.C. y A.A. Conde. 1985. Estimación del factor “R” de la ecuación universal de pérdida de suelos para el centro este de la República Argentina. Ciencia del

Suelo. Vol 3 (1-2), 85-94. En www.suelos.org.ar/publicaciones/ vol_3n1y2/ Rojas.pdf

Troeh, F.R., Hobbs, J.A. y R.L. Donahue. 1991. Soil and Water Conservation. Second Edition. Prentice Hall, Inc. 530 pp.

USDA - Agricultural Research Service. 2008. Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2). http://www.ars.usda.gov/sp2UserFiles/Place/64080510/RUSLE/RUSLE2_User_Ref_Guide.pdf.Fecha de último acceso: Marzo 2012.

Walter, C. y H. Stützel. 2009. A new method for assessing the sustainability of land-use systems (II): Evaluating impact indicators. Ecological Economics 68: 1288-1300.

Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. USDA Agricultural Research Service. Handbook 537.

ANEXO I

Sistemas de unidades utilizadas en USLE-RUSLE

1- Dimensiones de los factores de la ecuación universal de pérdida de suelo

Factor	Símbolo	Dimensiones	Unidades del sistema de unidades de EEUU
Intensidad de la lluvia	i o I	L/T	plg/h
Energía por unidad de precipitación	e	L*F/A*L	pie*t fza/ac*plg
Erosividad de la tormenta	EI	L*F*L/A*T	ctos pies*tfza*plg/ac*h
Pérdida de suelo	A	M/A*T	t/ac*año
Erosividad anual	R	L*F*L/A*T*T	ctos pies*tfza*plg/ac*h*año
Erodabilidad del suelo	K	M*A*T/A*L*F*L	t*ac*h/ctos ac*pie*t*plg
Longitud de la pendiente	L	$(L/L)^m$	
Gradiente de la pendiente	S	Adimensional	
Cobertura-manejo	C	Adimensional	
Prácticas de conservación		Adimensional	

Referencias:

L=longitud, T=tiempo, F=fuerza, A=área, M=masa

Plg=pulgada, h=hora, tnfza=tonelada de fuerza, ac=acre, ctos pies=cientos de pies, ctos ac=cientos de acres. Cientos de pies/acres significa que el valor numérico del factor es 0.01 veces su verdadero valor.

2- Factores de conversión para los factores de la ecuación universal de pérdida de suelo

Factor a convertir	Unidades del sistema de unidades de EEUU	Multiplicar por	Unidades obtenidas
Intensidad de la lluvia	plg/hr	25.4	mm/h
Energía por unidad de precipitación	pie*tfza/ac*plg	$2.638*10^{-4}$	MJ/ha*mm
Energía de la tormenta	pie*tfza/ac	0.006701	MJ/ha
Erosividad de la tormenta	ctos pies*tfza*plg/ac*h	17.02	MJ*mm/ha*h
Pérdida de suelo	t/ac*año	2.242	tm/ha*año
Erosividad anual	ctos pies*tfza*plg/ac*hr*año	17.02	MJ*mm/ha*h*año
Erodabilidad del suelo	t*ac*hr/ctos ac*pie*t*plg	0.1317	tm*ha*h/ha*MJ*mm

Referencias:

mm=milímetros, MJ=MegaJoule, ha=hectárea, tm=tonelada métrica

ANEXO II

Artículos sobre aplicación del software RUSLE2

Antronico, L; Cosciarelli, R; O Terranova. 2005. Surface erosion assessment in two calabrian basins (Southern Italy). En Batalla, R.J. and C. Garcia (Eds) Geomorphological processes and human impacts in river basins. IAHS Publication 299.

Birr, A. S; D.J. Mulla. 2001. Evaluation of the phosphorus index in Watersheds at the regional scale. J. Environ. Qual. 30:2018-2025.

Cisneros; J. M; Grau, J. B; Antón, J. M; De Prada, J. D; Degioanni, A. J; A. Cantero. 2011. Assessing multi-criteria approaches with environmental, economic and social attributes, weights and procedures: A case study in the Pampas, Argentina. Agric. Water Manage. 98:1545– 1556.

Cisneros; J. M; Grau, J. B; Antón, J. M; De Prada, J. D; Degioanni, A. J; A. Cantero; H. Gil. 2011. Evaluación multicriterio de alternativas de ordenamiento territorial utilizando modelos hidrológicos y de erosión para una cuenca representativa del sur de Córdoba. Laterra, P., E. Jobbágy y J. Paruelo (Eds.) 2011. Valoración de Servicios Ecosistémicos. Conceptos, Herramientas y Aplicaciones para el Ordenamiento Territorial. Ediciones INTA. 740 pp. ISBN: 978-987-679-018-5.

Cisneros, J. M; De Prada, J. D; Degioanni, A; Cantero Gutiérrez, A; Gil, H; Reynero, M. A; Shah, F; B. Bravo Ureta. 2004. Erosión hídrica y cambio de uso de los suelos en Córdoba. Evaluación mediante el modelo RUSLE 2. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná (Entre Ríos), En Actas del Congreso, trabajo completo en CD.

Dabney, S. M; Mc Gregor, K. C; Wilson, D. V; R. F. Cullum. 2009. How management of grass hedges affects their erosion reduction potential. Soil Sci Soc Am J.; 73:241-254.

Dabney, S. M; Yoder, D. C; Bingner, R. L; D. Vieira. 2008. Predicting runoff for a RUSLE2 ephemeral gully calculator. En: tucson.ars.ag.gov/isco/isco15 /pdf/Dabney S_Predicting runoff for a RUSLE2.pdf

De Prada, J. D; T. C. Lee; A. R. Angeli; Cisneros, J. M; A. Cantero G. 2008. Análisis multicriterio para la conservación de suelos: Aplicación a una cuenca representativa del centro Argentino. REDIBEC (Revista de la red Iberoamericana de economía ecológica) 15.

Capítulo 4: Manejo agronómico de la infiltración

4.1 Introducción

Como se mencionó en el Capítulo 2, la infiltración es el componente hidrológico más importante en la mayoría de las cuencas, capaz de disminuir el volumen y caudal de escurrimiento.

La infiltración es el proceso por el cual ingresa agua al suelo. Cuando la velocidad de infiltración es elevada, menos agua escurrirá y menor será el riesgo de erosión. La magnitud de esta variable se expresa en unidades de longitud por unidades de tiempo, normalmente mm/h.

Tanto la velocidad de infiltración inicial (inmediatamente comenzado el proceso) como la velocidad de infiltración final o base (luego de la estabilización del valor de velocidad de infiltración), constituyen las válvulas que regulan el ingreso de agua al perfil de suelo y de manera complementaria las pérdidas de agua por escurrimiento, (Capítulo 2).

Cualquier impedancia mecánica que modifique la estructura porosa del suelo y altere el ingreso y movimiento del agua afecta la velocidad de infiltración. Estos obstáculos disminuyen la conductividad hidráulica del suelo, actuando como retardadores del ingreso de agua, debido a que la conductividad hidráulica es función del diámetro efectivo de poros. Estos obstáculos, que responden principalmente a la física del suelo y a su cobertura, se pueden presentar en la superficie como en niveles más profundos del perfil del suelo.

El flujo de agua en un suelo saturado puede ser modelado mediante la ecuación de Darcy:

$$q = A \times K \times \frac{dh}{ds} = A \times K \times \frac{\Delta h}{L}$$

Donde:

q: caudal de flujo o tasa de flujo (m^3/h, cm^3/min)
A: sección transversal de suelo a través de la cual el agua fluye (m^2, cm^2)
K: conductividad hidráulica saturada (m/h, cm/min)
dh/ds: gradiente hidráulico en la dirección de flujo
$\Delta h/L$: gradiente de potencial en una distancia L

Para el manejo de la velocidad de infiltración es importante conocer y comprender los principales factores que la afectan.

4.2 Factores que afectan a la infiltración

4.2.1. Cobertura del suelo

Generar una protección mecánica de la superficie, impide que las gotas de lluvia impacten directamente sobre el suelo, evitando de esta forma el desmenuzamiento de los agregados con la consecuente desestabilización y

obstrucción de los poros por partículas pequeñas. De esta forma evita que se formen sellos superficiales, característicos de suelos desnudos con escaso coloide agregante (i.e. materia orgánica y arcilla).

Por otro lado, la cobertura de rastrojo también ejerce un efecto amortiguador ante las presiones ejercidas en el área de contacto rueda-suelo (Torbert y Reeves, 1995), así como también en el caso del pisoteo animal en el área de contacto pezuña-suelo.

4.2.2. Estabilidad estructural, distribución de tamaño de poros y de agregados estables

La distribución de tamaño, la continuidad y la estabilidad de los poros del suelo son características fundamentales de su estructura, debido a su efecto sobre la infiltración y redistribución de agua dentro del perfil de suelo. Un elevado número de poros grandes y estables se asocia con la parte viva del suelo, un elevado contenido de materia orgánica, presencia de organismos responsables de la descomposición de los residuos vegetales, lombrices del suelo y raíces. De acuerdo a la clasificación propuesta por Kay (1990) los macroporos y grietas (60 µ - hasta algo más de 1 m) son los responsables de la aireación y del drenaje rápido.

La distribución de tamaño de agregados mantiene una relación jerárquica con las partículas del suelo ya que estas tienden a formar microagregados por uniones con la materia orgánica humificada y recalcitrante (complejos arcillo-húmicos). La materia orgánica fácilmente descomponible (materia orgánica lábil) tal como hifas de hongos y algunos polisacáridos unen microagregados en macroagregados, tamaño que incide directamente en el flujo de aire y agua en el suelo.

Los poros estructurales son los espacios vacíos entre agregados. Del mismo modo que los agregados, esta porosidad es dinámica y está afectada por factores exógenos como el clima a través de los ciclos de humedecimiento-secado y/o congelamiento-descongelamiento, los sistemas de cultivos a través de sus efectos sobre el sistema radical, el pisoteo y pastoreo animal junto con otros factores bióticos y por el manejo del suelo a través de la labranza, manejo de los residuos y tránsito agrícola (Taboada, 2008).

4.2.3. Costras y sellos superficiales

El sello superficial es la principal causa de la baja tasa de infiltración de agua y del alto riesgo de escurrimiento y erosión. Esta impedancia mecánica resulta del efecto combinado del impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo, del humedecimiento y de la dispersión de las partículas de arcilla a partir de una estructura de baja estabilidad y sin protección ante el efecto de la lluvia. Este proceso conduce a la liberación de partículas finas que al ser movilizadas van a rellenar los poros y huecos del horizonte superficial, dando lugar a la formación de costras o sellos superficiales, lo que comúnmente se denomina "planchado superficial".

Porta *et al*. (2003) plantea la distinción entre una costra y un sello superficial. La costra es una capa que puede tener varios mm a varios cm de espesor (0,5-3 cm). Es extremadamente compacta, dura, se agrieta y es mucho menos permeable al agua y al aire que el material inmediatamente subyacente y suele presentar estructura laminar y vesicular (huecos cerrados sin interconexión entre ellos). El sello en cambio, es una capa más delgada (1 a 5 mm), muy densa y dura, sin porosidad, que no se agrieta y que cuando se seca puede formar una costra (Figura 4.1).



Figura 4.1: a) Sello o planchado superficial en un Haplustol típico de la zona de General Deheza, Córdoba, Argentina; b) Estructura laminar en superficie de un Argiudol franco arcillo limoso de Monte Buey, Córdoba, Argentina (SECyOT-UNRC).

Taboada *et al*. (2010) reconocen la existencia de dos tipos de costras o sellos: las costras estructurales que se desarrollan in situ y las costras sedimentarias o deposicionales que se forman predominantemente de material que ha sido transportado desde su localización original. En la Figura 4.2 se observa la presencia de un sello producido por la deposición de sedimentos transportados por el escurrimiento y que posteriormente fueron depositados en sectores más bajos del relieve, (discutido además en Capítulo 3).



Figura 4.2: Sello formado por la deposición de sedimentos provenientes de la parte alta de un lote recién sembrado con soja en la zona de General Deheza, Córdoba, Argentina (SECyOT-UNRC).

De acuerdo a los mismos autores citados precedentemente, el encostramiento es un proceso cuya ocurrencia depende de tres factores o condiciones de clima-suelo y manejo: a) lluvias de elevado potencial de energía cinética, b) suelo con escasa o nula cobertura superficial y c) suelo con baja estabilidad estructural, de modo que si alguno de estos factores no aparece, no se produce encostramiento o sellado superficial (Figura 4.3).

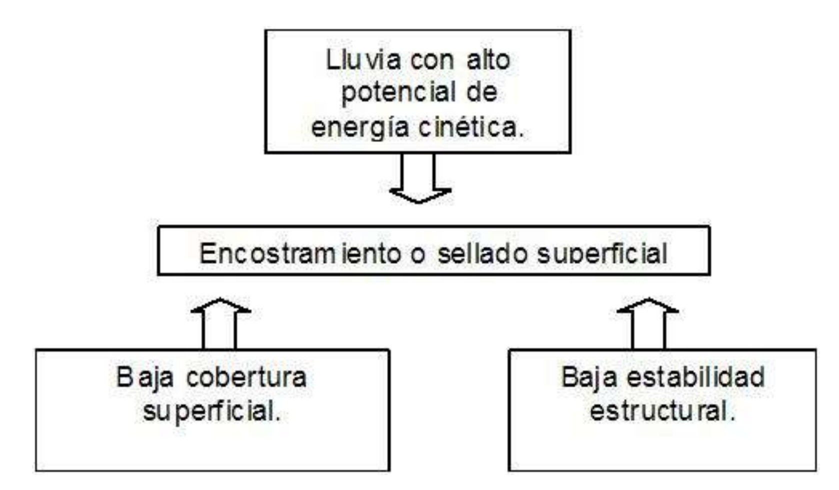


Figura 4.3: Factores que inciden en la ocurrencia del encostramiento superficial (adaptado de Taboada *et al*., 2010).

Aoki y Sereno (2006) estudiaron el proceso de velocidad de infiltración en un Haplustol típico franco limoso de Córdoba mediante la utilización de un microsimulador de lluvia, en dos condiciones de uso: monocultivo de soja en labranza convencional y bosque nativo. Las características físicas de los primeros 20 cm de suelo de ambas situaciones se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Propiedades físicas de los primeros 20 cm de suelo en dos situaciones de uso.

Variable	Monocultivo de soja	Bosque nativo
Densidad Aparente (Mg m^{-3})	1.25	1.04
Porosidad Total (%)	53	61
Materia Orgánica (%)	1.96	3.76
Índice de agregación *	29.8	60.0

*A mayor valor del Índice de agregación, mayor estabilidad de la estructura.

Observaron que en la situación con monocultivo de soja el patrón de comportamiento de la velocidad de infiltración para intensidades inferiores a 60 mm h^{-1} puede dividirse en tres segmentos diferenciados en el tiempo: una primera etapa donde la velocidad de infiltración permanece constante, una segunda etapa en donde los valores caen rápidamente y una tercera de estabilización final de las medidas. Observaron además, que la primera etapa se prolongaba en el tiempo a medida que la intensidad de la lluvia simulada descendía (Figura 4.4). Estos autores sostienen que la formación de sello superficial tiene un impacto marcado sobre la velocidad de infiltración inicial (primera etapa del proceso), la cual es de gran importancia en la recarga de agua en el perfil antes de que se inicie el escurrimiento.

En la situación de bosque nativo, con intensidades de lluvia iguales o inferiores a 130 mm h^{-1}, con bajo contenido de humedad, no se presentó este comportamiento en la dinámica de la infiltración en el lapso de 1 h de ensayo, permaneciendo constante la magnitud de la velocidad de infiltración, con valores en el orden de la intensidad de lluvia aplicada, (Figura 4.5). En esta situación sólo se observó la etapa de descenso de la velocidad de infiltración cuando los valores de intensidad impuestos fueron superiores a 130 mm h^{-1} (Figura 4.6).

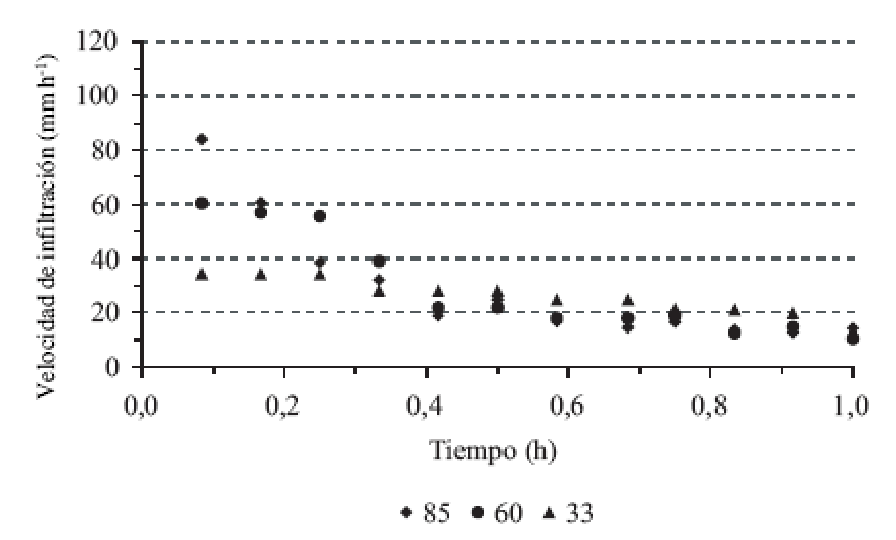


Figura 4.4: Valores experimentales de velocidad de infiltración en una situación de monocultivo de soja en labranza convencional, con intensidad de lluvia simulada de 85, 63 y 33 mm h^{-1} (Aoki y Sereno, 2006).

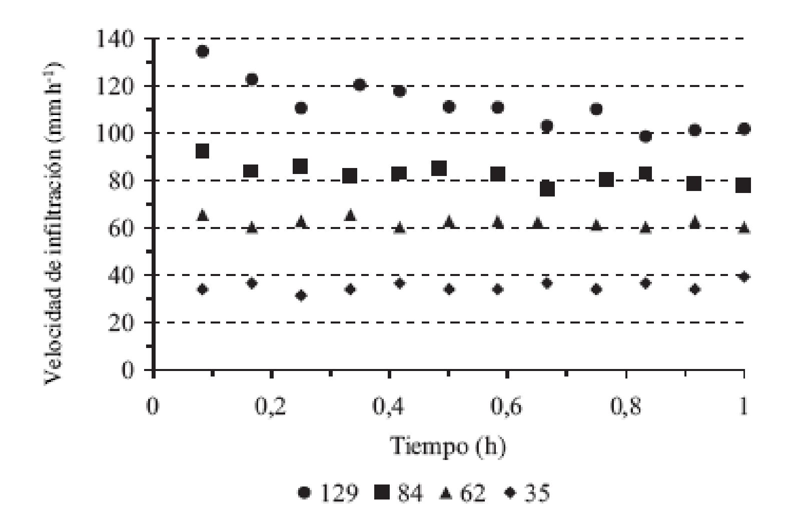


Figura 4.5: Valores experimentales de velocidad de infiltración en una situación de Bosque nativo, con intensidad de lluvia simulada de 129, 84, 62 y 35 mm h^{-1} (Aoki y Sereno, 2006).

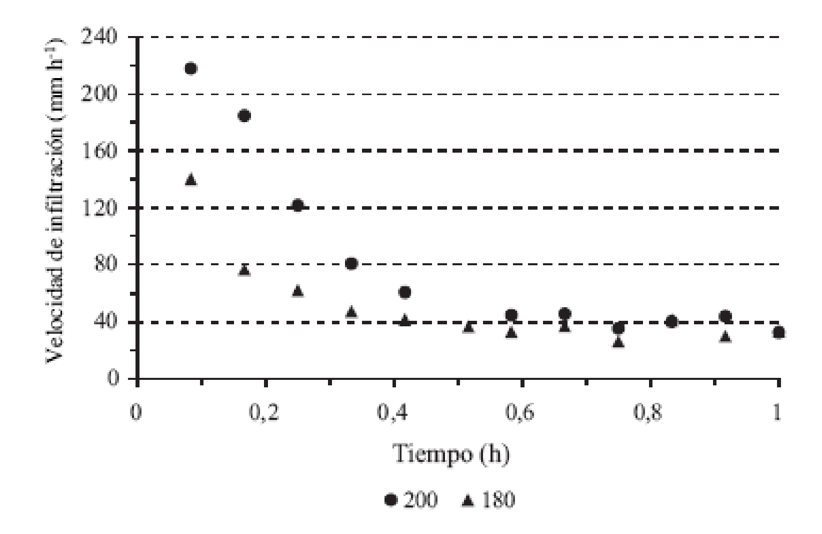


Figura 4.6: Valores experimentales de velocidad de infiltración en una situación de Bosque nativo, con intensidad de lluvia simulada de 180, y 200 mm h^{-1} (Aoki y Sereno, 2006).

De acuerdo a estos autores, estas diferencias entre las situaciones de uso y entre el efecto de las diferentes intensidades de precipitación simuladas, indican la existencia de un valor crítico de energía de lluvia acumulada, con el cual se produce un cambio físico-químico de los agregados del suelo, asociado al contenido de materia orgánica y a la estabilidad de la estructura frente al impacto de la gota de lluvia, así como a la densidad y porosidad total de la capa superficial, lo que define que en la situación bajo monocultivo de soja se produzca un taponamiento de los poros superficiales que provoca una disminución más rápida de la velocidad de infiltración comparado con el suelo del bosque nativo, en el que sólo se observa este comportamiento cuando se producen lluvias de elevada intensidad o de elevado potencial de energía cinética (modelo USLE, Capítulo 3).

4.2.4. Contenido de agua antecedente

El contenido de agua antecedente influencia la tasa de desprendimiento de partículas al momento de producirse una lluvia.

Mientras mayor es el contenido de contenido de agua en el suelo al momento de producirse una precipitación, menor será el espacio poroso capaz de absorber esa recarga de agua y por lo tanto mayor será la pérdida de agua por escurrimiento y el potencial erosivo del mismo. Recordar lo analizado en el capítulo 2 en cuanto a cómo varía el valor de curva número (indicador del escurrimiento potencial) con el contenido de humedad antecedente que presenta el suelo.

Por otro lado, es necesario considerar que la energía cinética requerida para romper los agregados superficiales decrece a medida que disminuye el contenido de agua en el suelo, de modo que agregados secos al aire presentan mayor susceptibilidad a dispersarse que cuando están húmedos, porque al producirse un rápido humedecimiento de los agregados secos se genera una brusca liberación del calor de humectación y del aire entrampado, dando como resultado una desintegración de la estructura más rápida que cuando los agregados están húmedos al producirse la lluvia.

La influencia del contenido de agua antecedente en el desprendimiento y erosión del suelo es función de las características de la lluvia, de la textura y la materia orgánica edáfica.

Las características de la lluvia, como la distribución de la intensidad de precipitación y su frecuencia tienen importancia en este sentido. Tormentas con elevada intensidad inicial en una condición de suelo seco, generarán un elevado desprendimiento de partículas dejándolas susceptibles a ser transportadas cuando se inicie el proceso escurrimiento superficial. Si antes de una precipitación de alta intensidad y milimetraje, lluvias anteriores de menor magnitud pero frecuentes han generado condiciones de elevado contenido de agua antecedente en el suelo, el volumen de escurrimiento será elevado en comparación a una lluvia con similares características en condiciones de baja humedad antecedente.

El efecto de la textura y de la materia orgánica se asocia a la estabilidad de la estructura frente a condiciones de rápido humedecimiento.

4.2.5. Compactación, impedancias mecánicas, densificaciones

Las densificaciones o compactaciones por definición disminuyen la porosidad total del suelo, afectando principalmente los poros grandes, responsables en mayor medida del movimiento rápido del agua en el suelo.

Las impedancias mecánicas pueden producirse en superficie o subsuperficialmente. Canarache (1991) plantea que las costras o sellos son compactaciones extremadamente superficiales (0-5 cm); las impedancias superficiales aparecen en los primeros 20 cm, pudiendo diferenciarse entre aquellas que aparecen en la zona de siembra (0-10cm) asociadas a la compactación por tráfico, de las que aparecen en la zona arable (en labranza convencional) (10-20 cm). Subsuperficiales son las compactaciones que aparecen dentro de los primeros 20-30 cm de profundidad, como resultado de pisos de labor (i.e. piso de arado) y compactación por tráfico.

Las densificaciones extremadamente superficiales y superficiales en la zona de siembra reducen la velocidad de infiltración inicial y el tiempo en que se inicia el escurrimiento, mientras que las superficiales en la capa arable y subsuperficales reducen la velocidad de infiltración final.

La estructura de las capas densificadas presenta un carácter masivo, caracterízado por grandes unidades estructurales, sin porosidad visible en sus caras de ruptura (Figuras 4.7 y 4.8). Alteran la normal exploración de raíces y disminuyen el flujo de agua y aire en el perfil de suelo (Figuras 4.9 y 4.10).



Figura 4.7: Impedancia mecánica sub-superficial en un Haplustol típico con una intensa historia de uso y manejo (SECyOT-UNRC).



Figura 4.8: Gran unidad estructural en capas densificadas, en un Haplustol típico franco arenoso muy fino (SECyOT-UNRC).



Figura 4.9: Impedancia mecánica superficial en un Hapludol típico de la Serie Ordoñez, con un cultivo de trigo (SECyOT-UNRC).



Figura 4.10: Cultivo de maíz en un Hapludol típico bajo siembra directa con problemas de anegamiento temporario por impedancias superficiales (SECyOT-UNRC).

Para el manejo de las impedancias mecánicas resulta importante considerar y comprender los factores que producen compactación, entre ellos:

- Predisposición del suelo a compactarse

La textura edáfica o la distribución de tamaño de partículas pueden determinar la susceptibilidad a la compactación: suelos cuya granulometría presenta escasa gradación de tamaños, con elevada proporción de partículas finas tendrán menos habilidad para compactarse, mientras que suelos que presentan una gradación de tamaño de partículas más uniforme que abarca todo el rango de clases de diámetro, presentan elevada susceptibilidad a este proceso de degradación.

Algunos ejemplos de este último caso son los suelos de textura franca y franca-limosa de la llanura húmeda bien drenada del este de la provincia de Córdoba cuya productividad puede verse disminuida por el efecto de la degradación física y de los procesos de erosión hídrica asociados a ella (Figuras 4.9 y 4.10); suelos de áreas de derrame de ríos y arroyos, se presentan estratificados y con granulometría variable, lo que junto con la presencia de gravas define una elevada susceptibilidad a la compactación; suelos de textura franca-arenosa del centro-sur de Córdoba presentan baja estabilidad estructural mostrando no sólo una elevada susceptibilidad a la formación de panes antrópicos sino que también dificultad para lograr una reversión duradera a partir de su fisuramiento con labores mecánicas, evidenciándose procesos de recompactación en el corto plazo, (i.e. en el ciclo de un cultivo, 1 a 2 años posteriores a la labor de fisuramiento de capa compactada). En todas estas situaciones se producen marcados descensos en la velocidad de infiltración con valores inferiores a los 10 mm/h, produciéndose elevados caudales de escurrimiento superficial (coeficientes de escurrimiento del orden del 60%) (Cisneros *et al*., 1997), a los que se asocian procesos de erosión hídrica de variada magnitud y forma.

Un caso especial lo constituyen los suelos con horizontes sódicos de ambientes salino-sódicos (Natracualfes, Natracuoles), en los que por efecto de dispersión de las arcillas producto de la abundancia del ión Na^+ en las posiciones de intercambio y en la solución del suelo, se produce el apelmazamiento de la estructura y con ello la velocidad de infiltración se reduce a valores cercanos a 0, con coeficientes de escurrimiento que alcanzan valores medios del 90% en sectores donde la superficie se encuentra descubierta y bajo la influencia del pastoreo (Cisneros *et al*., 1999).

- Suelos recientemente laboreados

Los suelos que han sido recientemente laboreados se encuentran flojos y no son capaces de oponer resistencia frente a las fuerzas compresivas del tráfico de vehículos. Esta condición genera procesos de recompactación asociados a las presiones ejercidas sobre el suelo con el manejo postlabor y de postsiembra y de reconsolidación de la estructura (i.e unión de partículas y agregados) debido a procesos de humedecimiento y secado bajo la influencia de las raíces de plantas (Koolen y Kuipers, 1983).

- Suelos húmedos o mojados

Estos suelos poseen una resistencia reducida y pueden estar sujetos a compactación si son sometidos a presiones ejercidas por el transito cuando su contenido de agua está próximo a capacidad de campo o es superior a él (Figura 4.11).



Figura 4.11: Huella producida por el tránsito de cosecha en condiciones de excesiva humedad en un Haplustol típico de la llanura ondulada del sur cordobés (SECyOT-UNRC).

La susceptibilidad a la compactación o compactabilidad es definida como la vulnerabilidad o riesgo del suelo a la compactación, y puede ser evaluada a través de diferentes metodologías, entre ellas el test Proctor (Kézdi, 1980), el cual es una alternativa experimental que provee un método estandarizado para determinar la resistencia del suelo a la compactación ante la aplicación de una cantidad de energía constante en un rango de contenidos de agua.

A través de este test se determina la Densidad Aparente Máxima (DA_{max}), definida como el máximo valor de compactabilidad que puede alcanzar un suelo en particular y el contenido de agua al cual se alcanza ese nivel de compactación, denominado Contenido de humedad crítico ($CH_{crítico}$) o contenido de agua óptimo para la compactación (Figura 4.12).

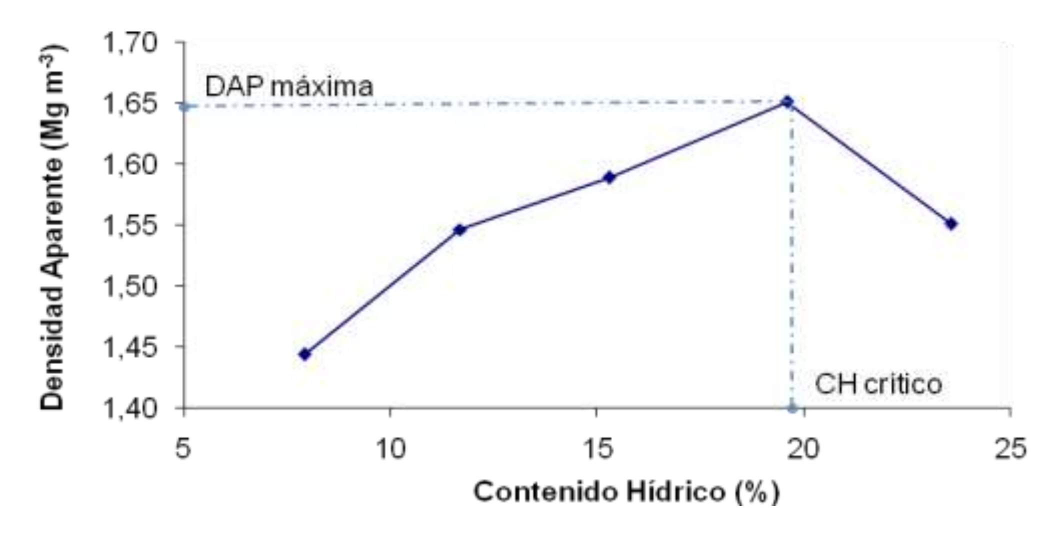


Figura 4.12: Curva de compactación obtenida mediante test Proctor, correspondiente a la capa de 0-5 cm de un Hapludol típico franco arenoso del sur de Córdoba (adaptado de Cabrera *et al*., 2011).

La (DA_{max}) está fuertemente relacionada con la presencia de arcilla y limo, con altos contenidos de agua y con el contenido de carbono orgánico de los suelos.

En relación a ello, Howard *et al*. (1981) concluyeron que aquellos suelos que tienen un contenido de agua a capacidad de campo cercano o por encima del $CH_{critico}$ tienen mayor probabilidad de compactarse que aquellos donde el contenido de agua a capacidad de campo esta por debajo del $CH_{critico}$. Este aspecto resulta de relevancia al momento de realizar una labor mecánica en el suelo ya que el estado de consistencia friable, óptimo para la realización de la mayoría de las labores de pre y postemergencia de los cultivos y para la cosecha del mismo, se encuentra cuando el suelo presenta un contenido de humedad próximo al de capacidad de campo (Baver *et al*., 1972).

Pecorari *et al*. (1993), Quiroga *et al*. (1998) y Díaz Zorita *et al*. (2000) concluyen que en los suelos de la región Pampeana Argentina es el contenido de materia orgánica la propiedad que tiene mayor efecto sobre la $DA_{max,}$ es decir que la compactabilidad disminuye y el $CH_{crítico}$ aumenta a medida que se incrementa el contenido de carbono total del suelo (Figuras 4.13 y 4.14).

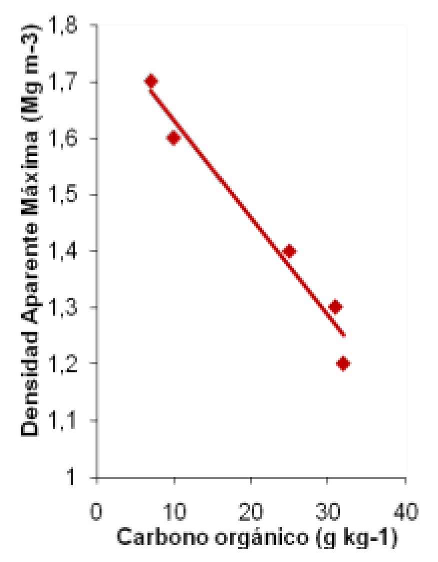


Figura 4.13: Densidad Aparente Máxima y contenido de Carbono Total de la capa superficial de 26 suelos de la región Pampeana, Argentina (adaptado de Díaz-Zorita y Grosso, 2000).

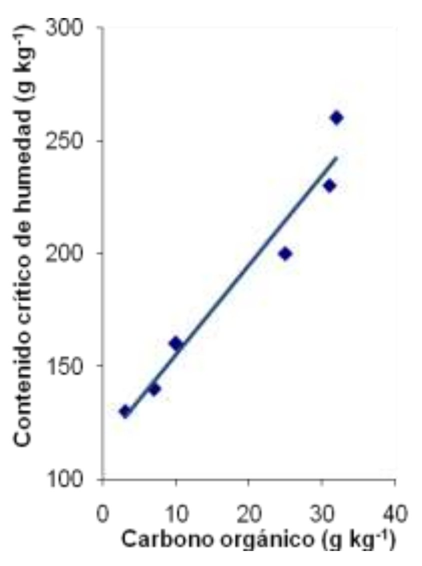


Figura 4.14: Contenido crítico de humedad y Carbono orgánico total de la capa superficial de 26 suelos de la región Pampeana, Argentina (adaptado de Díaz-Zorita y Grosso, 2000).

La presencia de materia orgánica reduce la densidad aparente del suelo debido a una combinación de procesos tales como dilución, agregación de partículas, elasticidad y fricción (Soane, 1990).

Glamuzina (2008) en un Hapludol típico franco arenoso del sur de la provincia de Córdoba evaluó el efecto del transito en tres condiciones de humedad del suelo y observó que hasta los 20 cm de profundidad en el suelo transitado a elevada humedad, la densidad aparente alcanzó valores significativamente superiores a los de las situaciones transitadas en condición de suelo seco y húmedo, las que no se diferenciaron de la situación testigo, no transitada (Figura 4.15). La porosidad total promedio de los primeros 20 cm fue de 53%, 52%, 51% y 45% en el suelo testigo, transitado en seco, próximo a capacidad de campo y en mojado, respectivamente.

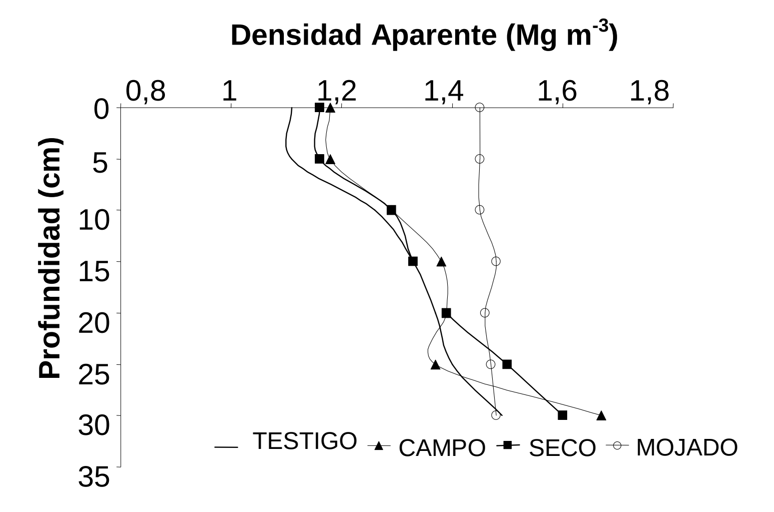


Figura 4.15: Perfil de Densidad Aparente en función de la humedad al momento del tránsito. Seco = Suelo seco (11 % g g^{-1}), Campo = Suelo próximo a capacidad de campo (21 % g g^{-1}), Mojado = Suelo Mojado (26 % g g^{-1}) (Glamuzina, 2008).

El contenido de agua del suelo al momento de realizar el tránsito no solo afecta la condición física superficial sino también subsuperficial del suelo, reduciendo tanto la velocidad de infiltración inicial como final. A elevada humedad, el efecto de compactación del suelo se maximiza y la profundidad de la zona afectada es mayor que cuando el mismo suelo se encuentra seco. Bajo estas condiciones se introducen presiones que penetran más allá del horizonte subsuperficial (Balbuena *et al*., 2009). En la Figura 4.16, mediante isobaras (líneas de igual presión) se representa cómo la presión de contacto del rodado con el suelo se introduce en él como tensión de compresión, extendiéndose en profundidad pero también lateralmente, siendo mayor la profundidad de compresión en el suelo húmedo que en el seco y mayor la profundidad de la huella en superficie.

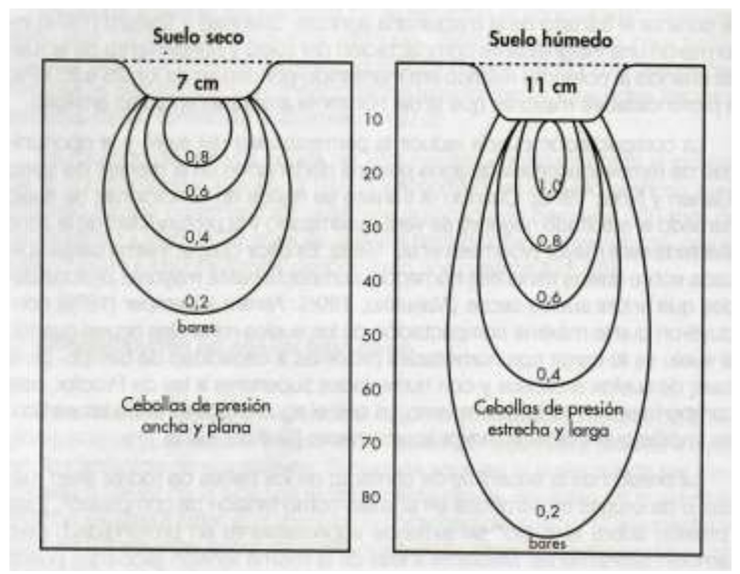


Figura 4.16: Distribución de la tensión de compresión bajo neumáticos con igual peso por rueda, en dos condiciones de humedad del suelo (Balbuena *et al*., 2009).

Los suelos de texturas francas, con arcillas de tipo expandente presentan resiliencia estructural, es decir, capacidad de recuperarse de un deterioro dado (e.g compactaciones de origen antrópico). Según Taboada *et al*. (2004) la resiliencia esta vinculada a la capacidad de autoestructuración debido a la generación de microgrietas durante el secado del suelo. Al producirse la contracción del agregado, estas grietas son estabilizadas por la acción de raíces que las atraviesan y de compuestos rizosféricos.

- Elevados pesos de los vehículos.

A medida que el peso del vehículo se incrementa, la carga sobre el suelo también se incrementa. Los tractores grandes, tolvas cargadas con granos, cosechadoras pueden causar excesiva compactación del suelo al superar ampliamente el valor de 4 Mg de carga en el eje trasero del vehículo, planteado por Botta *et al*. (2002) como el peso máximo por eje a partir del cual se produce compactación subsuperficial y aún el de 6 Mg/eje planteado por Hakansson (1994).

- Intensidad de transito.

El trabajo de máquinas agrícolas y el tránsito de tractores sobre suelo desnudo, y muchas veces en condiciones de excesiva humedad (estado de consistencia plástico), el pasaje repetido por una misma senda, la escasa superficie de contacto rueda suelo, neumáticos con carcasa diagonal, excesivas presiones de inflado, elevadas cargas por eje, constituyen un conjunto de elementos capaces de generar problemas severos de compactación a nivel superficial, en el corto plazo, y a nivel subsuperficial en el mediano y largo plazo.

En relación al tráfico agrícola, Balbuena *et al*. (2009) mencionan que durante el ciclo de un cultivo de cereal, más del 80% de la superficie del lote es transitado entre 1 y 9 veces por las ruedas del tractor y/o algún implemento.

El tránsito producido por la cosechadora es el más perjudicial para la estructura porosa, especialmente si esta operación se realiza en condición de suelo mojado cuando el contenido de arcilla es superior al 10%. Gerster *et al*. (2005) plantean que dentro de un lote agrícola, la proporción de la superficie de suelo afectada por la cosecha es elevada, sólo los rodados de la cosechadora cubren entre un 20 y 28% de la misma y si se considera el tránsito de las monotolvas, el área afectada por los rodados puede alcanzar el 40 % de la superficie.

Si bien tractores pequeños ejercen una carga baja sobre el suelo respecto a uno de mayor magnitud, pueden causar compactación si transitan repetidamente sobre el mismo sector. En relación a ello, un factor importante es la presión de contacto rueda/suelo, especialmente cuando el número de pasadas por la misma huella es inferior a 5, superado ese número comienza a tener efecto sobre la condición física del suelo el peso del implemento que transita. Hakansson *et al*., (1988) sostienen que existen responsabilidades independientes del peso y de la presión en el área de contacto rueda/suelo sobre las compactaciones subsuperficial y superficial, respectivamente.

Raper *et al*. (1995) trabajando en suelos franco arenosos y franco arcillosos observaron que cuando la presión de inflado es adecuada (Figura 4.17 a), las presiones en la interfase rueda/suelo extremas se producen sólo hacia los bordes de la rueda y son menores que aquellas que se generan cuando la presión de inflado de la rueda es excesiva (Figura 4.17 b), considerando una misma carga por eje.

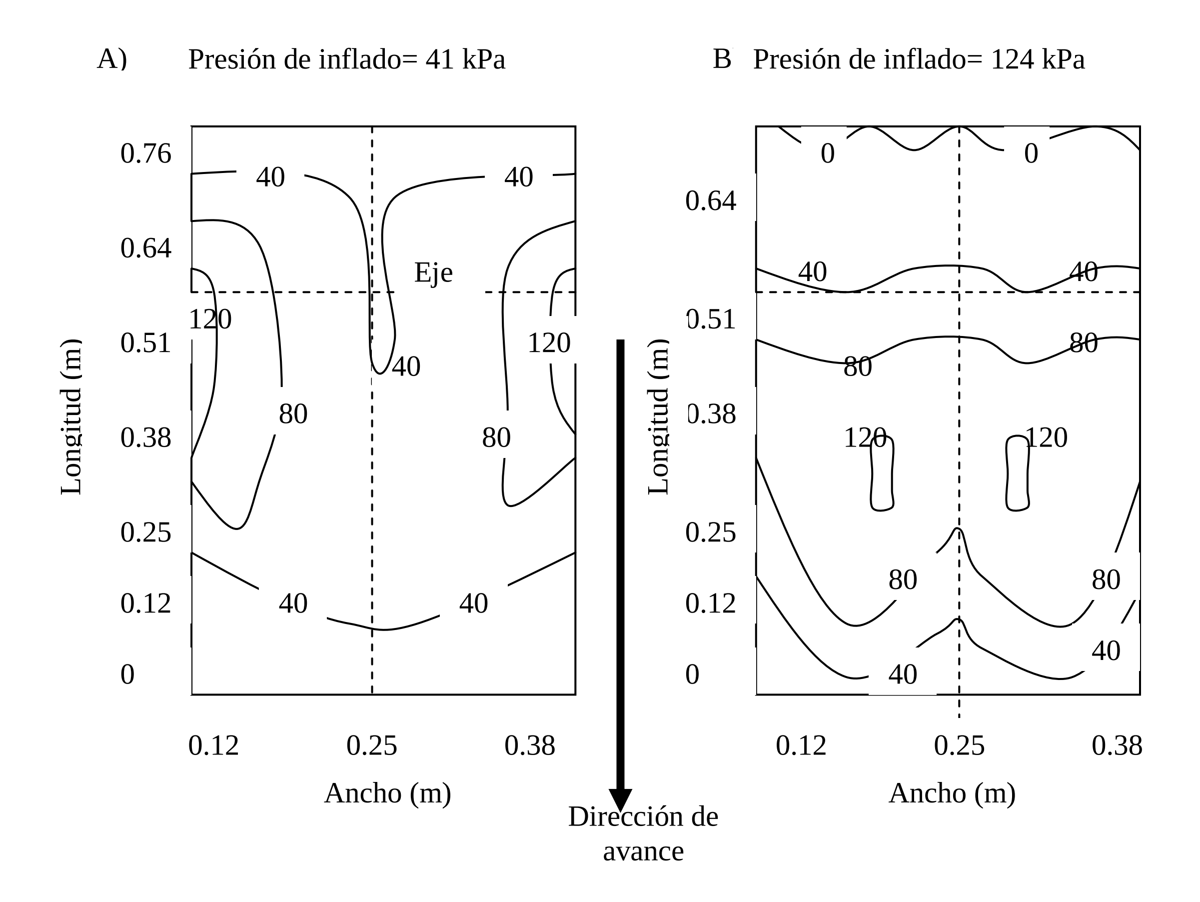


Figura 4.17: Presiones en la interfase rueda/suelo medidas bajo el pasaje de una rueda con A) presión de inflado =41 kPa y B) presión de inflado = 124 kPa. Ambas ruedas tienen una carga sobre el eje de 2.7 Mg. Las líneas de contorno indican presión (kPa) (adaptado de Raper (2005).

En una experiencia realizada por Botta *et al.*, (2000) sobre un suelo arado, se realizó el tránsito de un tractor liviano (2,1 Mg), con presión en el área de contacto ruedas traseras/suelo de 81 kPa y de otro tractor pesado (3,2 Mg), con presión ruedas/suelo de 69 kPa. Cada uno de ellos transitó 1, 5 y 10 pasadas respecto a un testigo sin tránsito y posterior a ello se evaluó la densidad aparente a diferentes intervalos de profundidad.

En el sitio donde transitaron los dos tractores, el incremento de la densidad aparente, respecto al testigo sin tránsito, fue función de la intensidad de tránsito en todos los intervalos de profundidad estudiados, es decir hubo mayor compactación a medida que aumentó el número de pasadas de los tractores. Sin embargo, él tránsito de 1 y 5 pasadas del tractor liviano produjo un incremento superior de la densidad aparente en los primeros 15 cm de suelo que el pasaje del tractor pesado (Figura 4.18 y 4.19), asociado este comportamiento a la mayor presión en el área de contacto rueda/suelo en el tractor liviano que en el pesado.

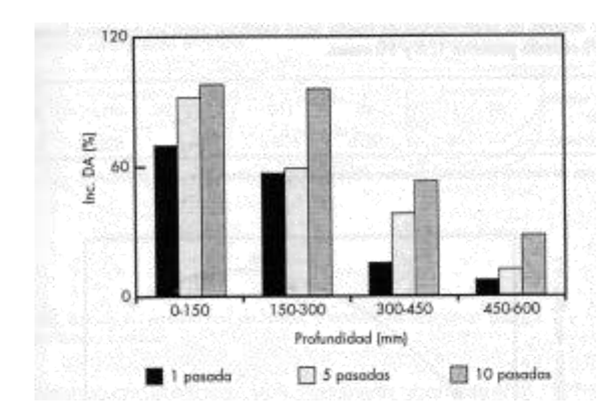


Figura 4.18: Incremento de la densidad aparente en cuatro intervalos de profundidad respecto al testigo sin tránsito, para 1, 5 y 10 pasadas de un tractor liviano (Botta, 2002).

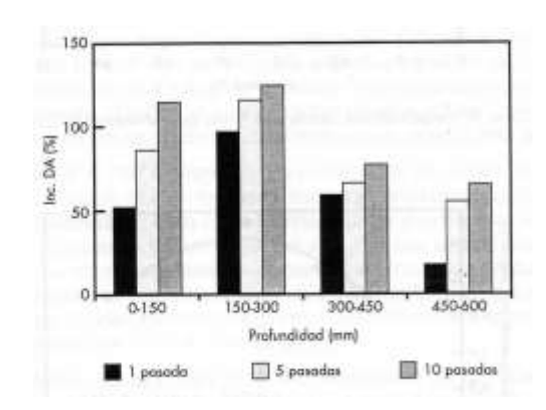


Figura 4.19: Incremento de la densidad aparente en cuatro intervalos de profundidad respecto al testigo sin tránsito, para 1, 5 y 10 pasadas de un tractor pesado (Botta, 2002).

- Pisoteo-pastoreo animal.

La magnitud de la erosión en tierras de pastizales y pasturas implantadas depende de la reducción en la cobertura vegetal superficial inducida por el pastoreo-pisoteo animal y de la degradación de las propiedades edáficas en superficie.

Según Blanco y Lal (2010), el excesivo pastoreo o sobrepastoreo incrementa el escurrimiento superficial y las pérdidas de suelo por erosión debido a:

- Remoción de la biomasa y reducción de la cobertura vegetal en pie o de su altura y de los restos vegetales que yacen sobre la superficie, dejando al suelo descubierto, lo que incrementa el impacto directo de la gota de lluvia y acentúa el desprendimiento y transporte de suelo por el agua de escorrentía. La altura y densidad de la vegetación en pie incrementa la fricción o rugosidad para el flujo del agua disminuyendo la velocidad del mismo.
- Reducción del desarrollo radicular y rebrote de las plantas y de la producción de biomasa. La densidad y cohesividad del sistema de raíces estabiliza la matriz del suelo previniendo el sellado superficial y el inicio de formación de surcos cuando el escurrimiento se concentra en un sector del terreno.
- Alteración de la estructura vegetal (i.e. pérdida de especies y reemplazo por otras que ofrecen menor biomasa protectora) y de la distribución de la flora y fauna, creando condiciones de una eventual desertificación, especialmente en situaciones de aridez y semiaridez, y
- La acción ejercida por el pisoteo animal repetido (e.g. pastoreo continuo), con elevadas cargas animales, especialmente cuando el contenido de agua edáfica es elevado, genera compactación superficial como consecuencia del amasado y remoldeado (Taboada, 2010) debido, como se explicó precedentemente, a que el suelo pierde la capacidad para resistir los esfuerzos que se le aplican, es decir pierde su capacidad portante. En regiones áridas o semiáridas o en condiciones de escasa humedad, el pisoteo animal rompe la estructura superficial y pulveriza la superficie del suelo, causando la pérdida de partículas finas por erosión eólica.

El escurrrimiento, erosión y riesgo de compactación están correlacionados negativamente con la cobertura superficial (Figura 4.20 a). La disminución de la superficie cubierta con vegetación y el incremento en el pisoteo, modifican el patrón de flujo de agua en el suelo, de modo que elevados niveles de compactación restringen el movimiento de agua y aire, reduciendo la conductividad hidráulica a partir de la disminución de la macroporosidad superficial (Figura 4.20 b).

En tierras bajo pastoreo animal, elevados contenidos de materia orgánica de la capa superficial y de biomasa radicular, constituyen un buffer contra las fuerzas compresivas que ejerce el animal (Blanco y Lal, 2010).

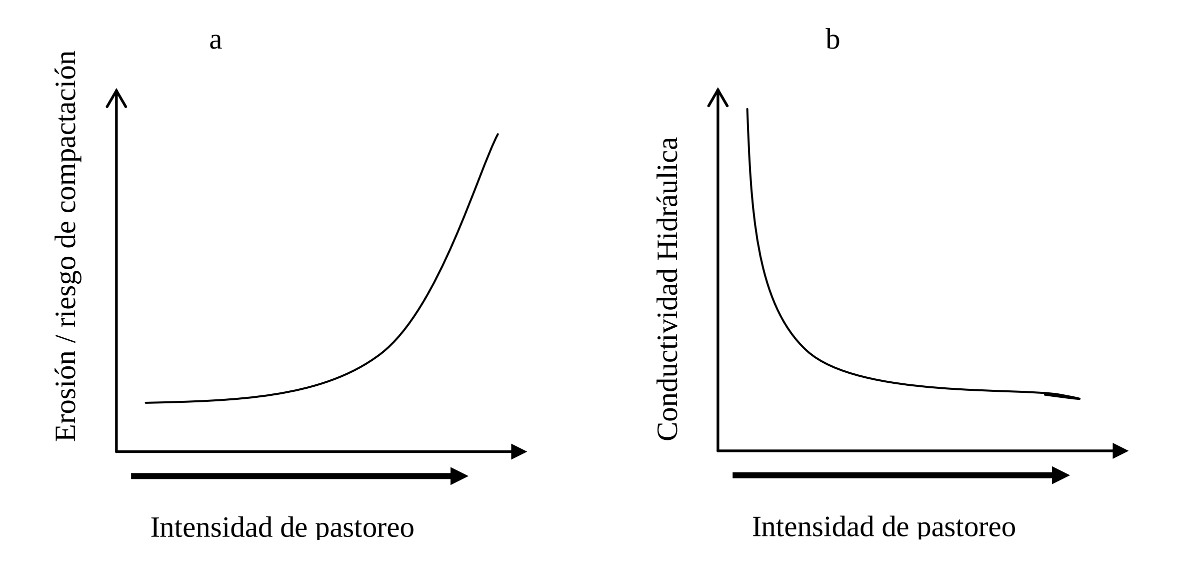


Figura 4.20. A) Relación entre erosión, escurrimiento e intensidad de pastoreo y B) relación entre conductividad hidráulica e intensidad de pastoreo (adaptado de Blanco y Lal, 2010).

4.3 Técnicas agronómicas para el manejo de la infiltración

El manejo de la infiltración, se basa en dos tipos de técnicas: a) técnicas que modifican la conductividad hidráulica del suelo para incrementar la velocidad de infiltración de agua, analizadas en el presente capítulo, y b) en técnicas que acortan la longitud de la pendiente mediante rugosidad superficial perpendicular a la misma, discutidas en el Capítulo 5.

La utilización de manera aislada o excluyente de cualquiera de estos conjuntos de técnicas no necesariamente resolverá la problemática abordada. Su utilización de manera complementaria ofrece una manera más integral de intervención sobre la situación problema. A modo de ejemplo, un sistema de terrazas de desagüe constituye una práctica auxiliar de control de erosión que tiene como objetivo disminuir la longitud de la pendiente que recorre el escurrimiento, retardar su velocidad de salida y conducir los eventuales excedentes hídricos de manera controlada, pero que su sola instalación no modifica la proporción total del agua que escurre, la que es regulada también por las técnicas de manejo del suelo entre terrazas que incrementan la velocidad de infiltración.

Las técnicas de manejo del suelo constituyen un conjunto de prácticas culturales o agronómicas tendientes a generar condiciones superficiales e internas del perfil de suelo que permitan incrementar y/o mantener la velocidad de infiltración del agua durante y después de producida una lluvia.

Ellas se basan en tres principios fundamentales:

- protección mecánica de la superficie del suelo;
- incremento de la estabilidad de agregados superficiales y subsuperficiales y,
- homogenización de la condición física interna del perfil de suelo y disminución de la compactación.

4.3.1. Protección mecánica de la superficie del suelo

Cobertura de rastrojos de cosecha

Se entiende como rastrojo al residuo dejado por el cultivo luego de su cosecha, el cual actua fundamentalmente sobre el proceso hidrológico de interceptación, y en menor medida sobre la detención y retención superficial, que fueron analizados en el Capítulo 2.

La influencia de los residuos de cosecha sobre las tasas de erosión, son consideradas en el modelo USLE-RUSLE en el factor C de cultivos (Capítulo 3).

Esta cobertura protege la superficie del suelo de los efectos erosivos de la lluvia y del viento generando un impedimento para que la gota no impacte directamente sobre el suelo y aumentando la rugosidad en superficie. De este modo evita el desprendimiento de las partículas y la obstrucción de poros por la migración de las mismas, mantiene condiciones propicias para la infiltración de agua en el perfil, disminuye las pérdidas de agua por escurrimiento y la pérdida de suelo por erosión.

El efecto protector que genera el rastrojo va a estar en función de la proporción de suelo cubierto por el mismo, de su distribución, de la cantidad y del tamaño de los residuos, ya que residuos grandes tardan más en descomponerse que residuos de menor tamaño, generando de esta forma una protección duradera en el tiempo. Es conveniente que el residuo este anclado en el suelo para que no sea arrastrado por el viento y/o el agua, además de producir un contacto suelo-rastrojo lo que aumenta la actividad microbiana generadora de uniones mecánicas y químicas entre agregados.

La cantidad de rastrojo, su tamaño y la proporción de suelo cubierto dependen del rendimiento de los cultivos, de la rotación o secuencia establecida, de las condiciones de manejo del suelo y del cultivo como sistemas de labranza y de cosecha utilizados y de las condiciones ambientales imperantes. Rotaciones que generen grandes cantidades de residuos y cobertura (e.g. soja-maíz, soja-trigo, maíz-soja-trigo-soja, sorgo-soja) como ocurre especialmente luego de la cosecha de la gramínea, junto con sistemas de labranza conservacionistas que no produzcan gran enterramiento de los mismos, son alternativas interesantes de manejo de la cobertura superficial en zonas susceptibles a la erosión. En sentido opuesto, el monocultivo de especies que producen escaso aporte de rastrojo (e.g. soja, maní, girasol) y sistemas de laboreo con intensa remoción superficial, exponen la superficie del suelo a la acción de los agentes erosivos. En las Figuras 4.21 a la 4.23 se aprecian diferentes condiciones de suelo-cobertura en rotaciones agrícolas, comunes de la región centro-sur de Córdoba, Argentina.



Figura 4.21: Cobertura dejada por los residuos de un cultivo de maíz en rotación con soja (SECyOT-UNRC).



Figura 4.22: Cobertura dejada por los residuos de un monocultivo de soja (SECyOT-UNRC).



Figura 4.23: Cobertura dejada por los residuos de un cultivo de maní (SECyOT-UNRC).

De La Vega *et al.* (2004) evaluaron el efecto de la cobertura superficial sobre la dinámica de la infiltración en un Argiudol tipico de la Serie Ramallo, provincia de Buenos Aires, manejado en siembra directa continua. Probaron dos tratamientos: con cobertura y sin cobertura superficial. Observaron que la presencia de rastrojos en superficie no modificó la velocidad de infiltración inicial, pero si la duración de la fase inicial del proceso de infiltración. En la situación cubierta el escurrimiento se inició a los 24, 1 mm de lluvia acumulada, mientras que cuando el suelo estuvo descubierto el escurrimiento se inició a los 11, 6 mm de lluvia. Asimismo, en el tratamiento con cobertura la velocidad de infiltración final fue superior y la pérdida de suelo fue inferior que en el tratamiento sin cobertura superficial. En relación a estos resultados, los investigadores concluyeron que si bien la siembra directa había incrementado la estabilidad de la estructura del suelo en estudio, este incremento no fue suficiente para que al quitar la cobertura, la tasa de infiltración final fuese la misma que en la situación con cubierta superficial.

Chagas et al. (2004) en similar suelo y tratamientos que los del trabajo anterior, encontraron que en el suelo descubierto se produjo menor infiltración y mayor escurrimiento en comparación con el suelo que presentaba cobertura, debido a la degradación estructural y formación de sello en superficie. Esta desagregación de las partículas permitió su migración en sentido vertical junto con el agua percolada, ocasionando un taponamiento de poros que disminuyó la conductividad hidráulica saturada y la velocidad de infiltración final.

A partir de la relación entre el riesgo de erosión producida en situaciones con diferente grado de protección superficial, respecto a una condición de superficie sin cobertura, Merrill *et al*. (2002), estimaron el potencial relativo de erosión en relación a la cobertura superficial (Figura 4.24). El riesgo de erosión disminuye marcadamente a partir de un 40% de cobertura superficial, reduciendo principalmente la capacidad de los agentes erosivos (i.e. energía cinética de la lluvia y velocidad de escurrimiento superficial) de generar el desprendimiento de las partículas del horizonte superficial y de transportarlas en el agua de escurrimiento. En la Figura 4.25 se aprecia cómo disminuye el % de escurrimiento a medida que se incrementa la proporción de superficie cubierta, asociado fundamentalmente al mantenimiento de la velocidad de infiltración inicial al no haberse alterado la estructura de la capa superficial del suelo.

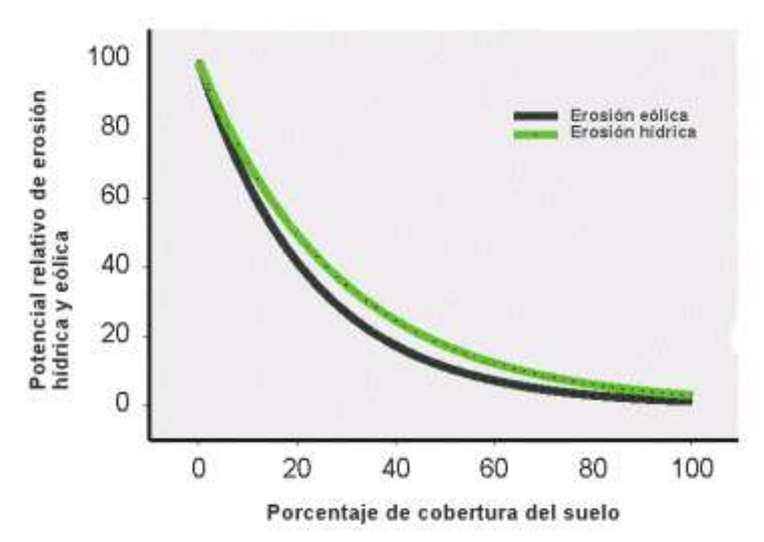


Figura 4.24: Efecto de la cobertura del suelo con residuos de cultivos sobre el potencial relativo de erosión hídrica y eólica
La función para la erosión eólica fue tomada del modelo RWEQ (Revised Wind Erosion Equation) y la función para la erosión hídrica proviene del modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). (Merrill, *et al*, 2002)

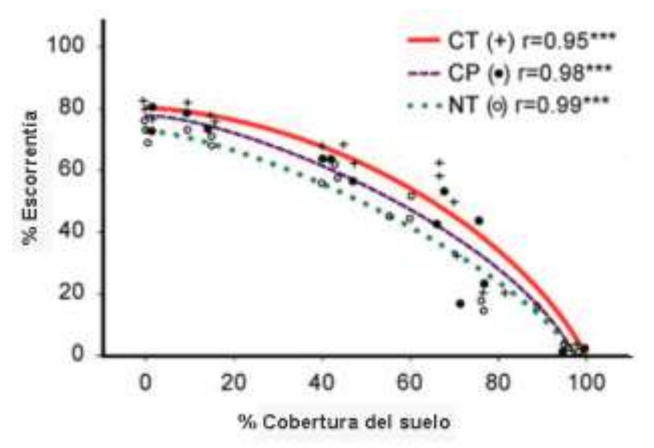


Figura 4.25: Escorrentía total después de 60 minutos de lluvia simulada de acuerdo con el porcentaje de cobertura y preparación del suelo (CT = Preparación Convencional, CP = Labranza mínima con Escarificador, NT = Siembra Directa). (Roth, 1985).

El manejo de los residuos puede generar grandes impactos en las propiedades dinámicas del suelo, pero la magnitud de los cambios dependerá del tipo de suelo, cantidad de residuos, sistema de laboreo y del clima. La interceptación del agua de lluvia a partir de la cobertura de residuos cobra una importancia superlativa en suelos de textura franco arenosa y franco limosa que presentan una vulnerabilidad natural al deterioro por su baja estabilidad de la estructura y por lo tanto al desprendimiento de partículas frente a la acción del agua y del viento.

En una experiencia con simulador de lluvia en Argiudoles típicos de Marcos Juarez, Marelli *et al*. (2006) evaluaron el efecto de la cantidad de rastrojos superficiales sobre las pérdidas de agua por escurrimiento y pérdida de suelo debida a la erosión (Figuras 4.26 y 4.27) Como puede apreciarse, la importancia de la cantidad de rastrojos está asociada a la proporción de cobertura que esa cantidad genera. Nótese que 4 t/ha y 8 t/ha de rastrojo sobre la superficie producen similar efecto sobre el escurrimiento superficial. Sin embargo cuando se aplica un sistema de laboreo que produce un cierto grado de enterramiento o incorporación del rastrojo (indicado como 4 incorporado y 8 incorporado), la condición con mayor cantidad de rastrojo puede permitir mantener o generar condiciones de bajo escurrimiento y especialmente de baja pérdida de suelo.

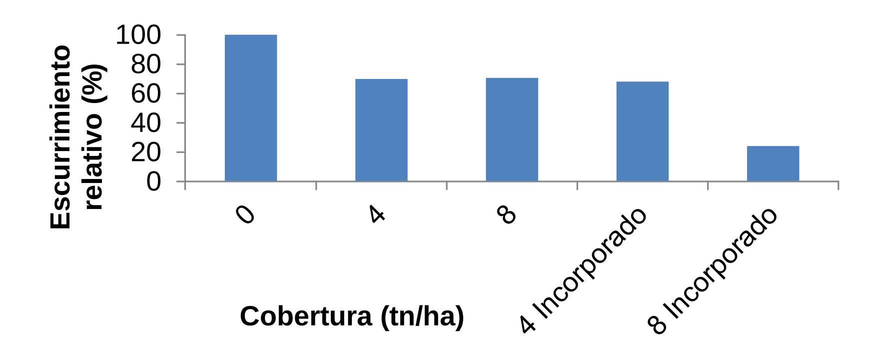


Figura 4.26: Relación entre Escurrimiento relativo (%) y cantidad de rastrojo en superficie. Adaptado de Marelli *et al*. (2006).

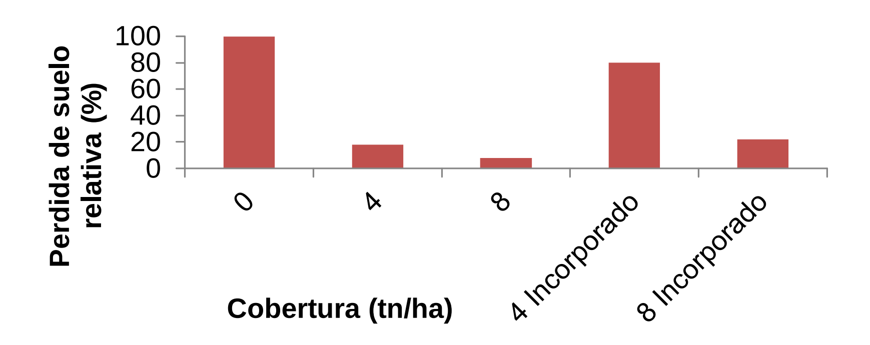


Figura 4.27: Relación entre Pérdida de suelo relativa (%) y cantidad de rastrojo en superficie. Adaptado de Marelli *et al*. (2006).

Cobertura por el canopeo de los cultivos en pie

Al igual que los rastrojos, el conopeo de los cultivos es capaz de interceptar la gota de lluvia, disminuyendo su energía cinética. Esta interceptación será mayor a medida que el vegetal crece y se desarrolla.

En relación a la época de crecimiento del cultivo, es importante la coincidencia entre el periodo de mayor cantidad e intensidad de precipitaciones con las etapas del cultivo en la que ofrezca cobertura al suelo, de modo de disminuir la incidencia de los agentes erosivos. Para la zona central de Córdoba, los cultivos estivales de siembra temprana (i.e. segunda quincena de septiembre- primera quincena de octubre), ofrecerían una adecuada protección superficial ya que hacia fines de la primavera e inicio del trimestre estival, cuando se producen las precipitaciones más intensas y copiosas, el canopeo de los cultivos ha cubierto parcial o totalmente el entresurco.

Los cultivos que cubren el entresurco en un período corto, ofrecen una rápida protección de la superficie del suelo. Un manejo cultural de la siembra, asociado a la velocidad de crecimiento de la especie a implantar, es la selección del distanciamiento entre hileras, de modo que los cultivos de crecimiento lento se siembren con un menor distanciamiento que aquellos de crecimiento rápido.

En las Figuras 4.28 y 4.29 se pueden observar diferentes cubrimientos del entresurco en dos cultivos comunes de la región centro-sur de Córdoba con diferente distanciamiento en las líneas de siembra.



Figura 4.28: Cultivo de maní sembrado a 70 cm entre hileras, con cubrimiento parcial del entre surco (SECyOT-UNRC).



Figura 4.29: Cultivo de mijo, sembrado al voleo, con cubrimiento total del suelo (SECyOT-UNRC).

La asociación de cultivos (i.e. intersiembra de pasturas, cultivos anuales intercalados, cultivos en fajas) ofrece una alternativa para la protección del suelo al producirse una ocupación simultánea del terreno de cultivos que ejercen protección con otros que lo hacen en menor medida ya sea por su velocidad de crecimiento o por encontrarse en diferente estadio de desarrollo (Figuras 4.30 y 4.31). La técnica del cultivo en fajas se discute en el Capítulo 5.

Por otro lado, el diferente aporte de materia orgánica que realizan cultivos de gramíneas y leguminosas producirá un incremento de la estabilidad estructural superficial en los sectores que recibieron un mayor aporte de residuos y de mejor calidad (relación C/N elevada), lo que hará necesario realizar una adecuada planificación de las rotaciones de los cultivos dentro del lote.

La cobertura del canopeo es una variable de entrada en la mayoría de los modelos utilizados para la predicción de la erosión hídrica, entre ellos la RUSLE (Capítulo 3).



Figura 4.30: Cultivos intercalados de soja y sorgo (Clarín.com, 2008).



Figura 4.31: Cultivos intercalados de soja y maíz (La Seguridad y los nuevos, 2007).

Mulch

Los mulchs orgánicos son usados generalmente en explotaciones intensivas como las frutihortícolas. Actúan cubriendo al suelo con algún tipo de material vegetal como pueden ser las cáscaras de arroz, maní, paja de trigo o de pastos, restos y

hojarasca de especies forestales, turba, entre otros Además pueden generarse naturalmente como ocurre en situaciones bajo monte o bosque implantado en donde los aportes de hojarascas,, restos de corteza y ramas va conformando un colchón de materiales orgánicos sobre la superficie del suelo. Producen un aporte de materia orgánica al suelo a partir de su descomposición gradual y generan una protección mecánica contra el efecto desagregante de las gotas de lluvia, manteniendo así inalterable la estructura superficial para la infiltración del agua en el suelo (Figuras 4.32 a la 4.34).



Figura 4.32: Mulch orgánico de restos forestales (SECyOT-UNRC).



Figura 4.33: Mulch de paja cubriendo el área circundante a una planta.



Figura 4.34: Mulch de restos forestales. Coloración oscura por materia orgánica producto de la descomposición del material (SECyOT-UNRC).

4.3.2. Incremento de la estabilidad de agregados superficiales y subsuperficiales

La estructura del suelo es una propiedad fundamental que influye sobre las condiciones que presenta el propio suelo, pero también sobre el ambiente asociado a él. Una estructura favorable y su estabilidad inciden en el mejoramiento de la fertilidad edáfica y de la productividad agronómica, al incrementar la porosidad y disminuir la erodabilidad del suelo o susceptibilidad a la erosión (Bronick y Lal, 2005).

Manejo de los residuos de cosecha

Los residuos de cosecha son capaces de incrementar el dinamismo microbiano del suelo en distintas magnitudes según queden en superficie o sean semincorporados, presenten elevada o baja relación C/N, según sean triturados o no.

Cuando un residuo es incorporado, tiene lugar una intensa actividad microbiana. En general, en primer lugar actúan hongos y actinomicetes que producen unión mecánica de los agregados mediante sus micelios. Los productos de la síntesis y descomposición también ejercen una función estabilizadora. El efecto de los hongos y actinomicetes es temporal ya que desaparece por descomposición bacteriana de los micelios. Con

posterioridad aparecen las bacterias, cuyo efecto estabilizador se debe en un 80 % a los productos de su metabolismo (i.e. gomas) y el 20 % restante a los cuerpos celulares.

La magnitud y durabilidad del efecto que la incorporación de los residuos realiza sobre la estabilidad estructural, es función básicamente de la calidad del residuo y del grado de transformación que presenta, de modo que la paja o cualquier resto orgánico muerto, pero todavía intacto, no tiene efecto sobre la estructura del suelo. Sólo durante su descomposición es que se forman sustancias agregantes y estabilizantes de las partículas de suelo, como los ácidos poliurónicos. Las sustancias prehúmicas (productos transitorios de la síntesis microbiana y de lenta transformación biológica), tienen una actividad menos intensa en la formación de estructuras estables, pero los agregados que se forman son más resistentes a la degradación (Primavesi, 1982).

Los procesos que desencadena la protección mecánica de la superficie junto con la semincorporación de los residuos, mejoran un conjunto de propiedades físicas del suelo tales como: porosidad, densidad aparente, diámetro medio ponderado, estabilidad estructural, conductividad hidráulica saturada, entre otras, responsables directa o indirectamente del ingreso y movimiento del agua en el suelo (Tabla 4.2).

Tabla 4.2: Influencia del rastrojo sobre propiedades físicas de la capa superficial de un suelo franco limoso (Blanco y Lal, 2010).

Propiedad	**Sin residuos**	**Con residuos**
Densidad Aparente (Mg m^{-3})	1.2 a	1.1 b
Índice de Cono (MPa)	1.2 a	0.9 a
Porosidad (mm mm^{-1})	0.5 b	0.6 a
Diámetro medio ponderado (mm)	1.5 b	2.6 a
Resistencia a la tracción (kPa)	56 b	252 a
Conductividad hidráulica saturada (mm h^{-1})	0.3 b	3.2 a
Contenido de agua disponible (cm)	0.7 b	1.5 a
Permeabilidad del aire (μm^2)	0.1 b	27 a
Lombrices (por m^{-2})	0.0 b	160 a
Contenido de materia orgánica (g kg^{-1})	33 b	49 a

Letras distintas entre columnas de una misma fila indican diferencias estadísticamente significativas

Enmiendas orgánicas

Abonos verdes

Son cultivos que se realizan en el propio terreno que se desea mejorar y cuya masa vegetativa es incorporada al suelo. Su objetivo principal es mejorar la condición química de los suelos a modo de fertilización orgánica o biofertilización (disponibilidad de nutrientes orgánicos, NO_3 principalmente), para la implantación de algún cultivo de cosecha. Un objetivo adicional es el aumento temporario de la estabilidad de agregados superficial del suelo.

Preferentemente se emplean leguminosas por su capacidad de fijación del N atmosférico y porque el material va a poseer una relación C/N más estrecha que el de gramíneas. Esta característica del abono genera una rápida descomposición del cultivo y estabilización de los agregados, pero de corta duración.

La incorporación de gramíneas, de relación C/N elevada, si bien puede provocar inmovilización del N, poseen una capacidad para cubrir más rápidamente el suelo y dejar un material más persistente que el de leguminosas, aspectos que pueden

resultar de importancia al momento de obtener una estabilización mas duradera de los agregados.

Es importante aclarar que esta técnica se basa fundamentalmente en la inclusión de cultivos invernales, época de baja disponibilidad hídrica en la región pampeana semiárida como la zona sur-oeste de Córdoba, cuestión que ocasiona dificultad en la adopción de la técnica debido a la competencia por el agua edáfica con el cultivo estival siguiente. No ocurre lo mismo en zonas donde las precipitaciones invernales son de mayor magnitud o presentan una distribución uniforme en el año.

Compost, lombricompuestos y estiércoles vacunos

Se denomina compost a todos aquellos materiales de origen vegetal o animal o mezcla de ambos, que tras sufrir un proceso de transformación, son incorporados al suelo. Estos productos tienen el carácter de material humificado y en este sentido su mayor valor reside, en las modificaciones que producen en la condición física, biológica, físico-química e inclusive en la condición química de los suelos.

El Lombricompuesto es una enmienda orgánica generada por el tubo digestor de la lombriz roja californiana, Eisenia Foétida. Ellas consumen el compost predigerido por microorganismos especializados (bacterias, hongos, etc.). Esta enmienda presenta valores de materia orgánica del orden del 50%, convirtiéndose en un excelente compuesto para incrementar la estabilidad estructural en los suelos.

El estiércol de origen vacuno constituye una fuente importante de material orgánico, con alta riqueza de nutrientes. Su calidad depende de la alimentación de los animales, así aquellos cuya alimentación se base en pasturas mas fibrosas, con una alto contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa, generaran estiércoles con una relación C/N más elevada que aquellos que se alimentan con altos contenidos de almidón y compuestos mas simples, siendo los primeros más propicios para la incorporación al suelo con el objetivo de incrementar la estabilidad estructural.

La mayoría de los estiércoles de ganado vacuno esparcidos por el suelo reducen la erosión por un incremento en la formación, estabilización y resistencia de los agregados, debido a la incorporación de materia orgánica al sistema. Según Grande *et al*. (2005), esta incorporación puede reducir la escorrentía en un rango del 70-90 % y la perdida de sedimentos entre el 80-95%. Algunos efectos del estiércol sobre las propiedades del suelo se pueden observar en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Impacto de la aplicación de estiércol en las propiedades de un suelo susceptible a la erosión hídrica manejado con siembra directa durante 35 años (Blanco y Lal, 2010).

Propiedad	Sin enmienda	Con enmienda
Densidad Aparente (Mg m^{-3})	1.21 a	1.09 b
Índice de Cono (MPa)	0.64 a	0.35 b
Porosidad (mm mm^{-1})	0.54 b	0.59 a
Diámetro medio ponderado (mm)	2.14 b	3.76 a
Conductividad hidráulica saturada (mm h^{-1})	0.08 b	0.37 ab
Infiltracion acumulada (cm)	86.7 ab	104.1 a
Contenido de agua a 0.3 bar (kg kg^{-1})	0.26 b	0.35 a
Materia organica (g kg^{-1})	30.5 b	86.03 a

Letras distintas entre columnas de una misma fila indican diferencias estadísticamente significativas

Rotaciones de cultivos: efecto de raíces de cultivos y pasturas

La rotación de cultivos influye sobre la estabilidad de la estructura, asociado fundamentalmente a su efecto sobre el contenido orgánico del suelo.

En rotaciones agrícolas, el contenido de carbono orgánico en el suelo es función del aporte de carbono que realizan los cultivos. En este sentido, cuando en la rotación se incorporan cultivos que producen elevada proporción de biomasa aérea y radicular, con relaciones C/N elevadas (e.g. maíz, sorgo, trigo), se realiza fertilización, que incrementa la producción de biomasa o se incluye más de un cultivo en el año, el aporte de compuestos orgánicos puede generar un balance positivo en el carbono orgánico al superar las pérdidas por mineralización de la materia orgánica del suelo. El efecto de la rotación sobre la estructura edáfica dependerá entonces del balance entre mineralización de la materia orgánica y el aporte de residuos orgánicos que realizan los cultivos y de la intensidad de remoción del suelo para la preparación de la sementera (Figuras 4.35 y 4.36).

En rotaciones agrícola-ganaderas el incremento de materia orgánica se produce especialmente durante la fase de pastura de la secuencia de cultivos, debiéndose en el corto plazo (i.e. el ciclo de la pastura) a un incremento de la materia orgánica lábil, por aporte de biomasa aérea y radicular y a una disminución de la intensidad de mineralización (Alvarez y Steinbach, 2006) (Figura 4.37.), pudiéndose alcanzar una situación parecida en sistemas agrícolas puros bajo siembra directa (Figura 4.36).

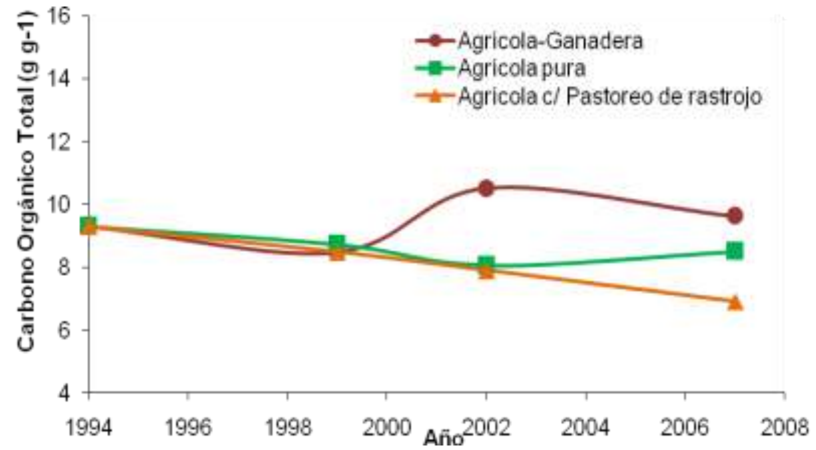


Figura 4.35: Evolución del Carbono Orgánico Total superficial de un Hapludol típico del sur de Córdoba, en tres rotaciones en Labranza convencional. (Espósito y Bricchi, datos no publicados)

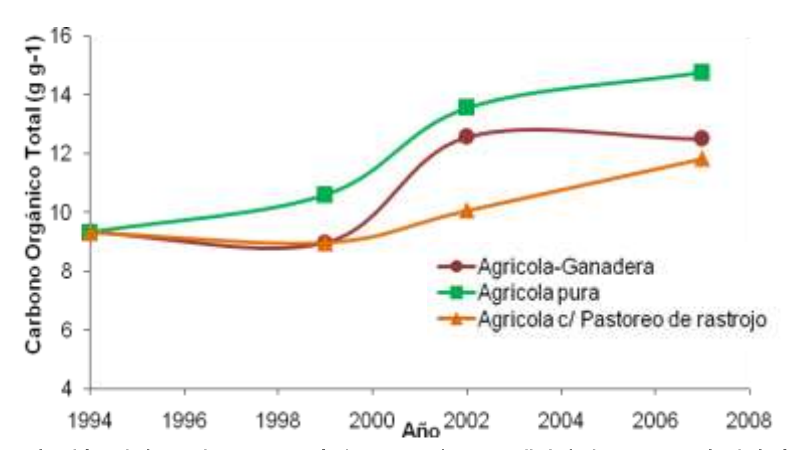


Figura 4.36: Evolución del Carbono Orgánico Total superficial de un Hapludol típico del sur de Córdoba, en tres rotaciones en siembra directa. (Esposito y Bricchi, datos no publicados)

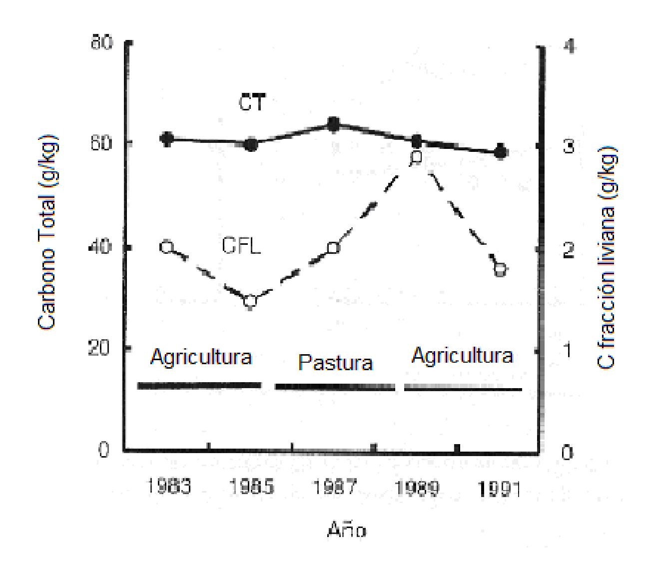


Figura 4.37: Evolución del Carbono orgánico total (CT) y del carbono de la fracción liviana (CFL) en relación a la fase de la rotación agrícola- ganadera (Alvarez y Steinbach, 2006**)**.

Lo planteado precedentemente en relación al efecto de las rotaciones y labranzas sobre la estabilidad estructural puede ejemplificarse con los resultados obtenidos por Peralta (2011), quien evaluó la estabilidad estructural a través del Diámetro medio de agregados (DMP) de los primeros 10 cm de un Hapludol típico del sur de Córdoba, en un ensayo de rotaciones (agrícola-ganadera y agrícola pura) y labranzas (siembra directa, labranza reducida y labranza convencional) de 20 años de duración (Figura 4.38).

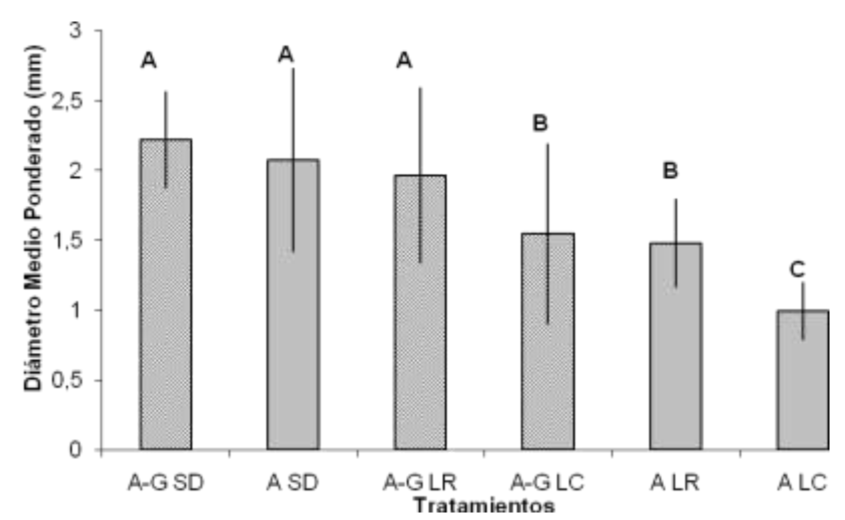


Figura 4.38: Efecto de la rotación y sistema de labranza sobre el diámetro medio ponderado de agregados (Peralta, 2011).
A-G SD = Rotación agrícola-ganadera, siembra directa; A-G LR = Rotación agrícola-ganadera, labranza reducida; A-G LC = Rotación agrícola-ganadera, labranza convencional; A-SD = Rotación agrícola, siembra directa; A LR = Rotación agrícola, labranza reducida; A LC = Rotación agrícola: labranza convencional

La rotación agrícola–ganadera, durante el ciclo que dura la pastura, produce un mejoramiento de la estabilidad estructural de la capa superficial del suelo respecto a la rotación agrícola pura y los sistemas de laboreo conservacionistas o de escasa remoción del suelo (i.e. siembra directa y labranza reducida) potencian este efecto. Al tomar como referencia la situación con mínimo disturbio, que presentó el mayor DMP= 2,69 mm, el efecto acumulado del uso y del manejo del suelo sobre la estructura, mostró un deterioro del orden del 22% en la rotación agrícola-ganadera con sistemas de labranza conservacionistas y en la rotación agrícola con siembra directa; del 43%

en la rotación agrícola-ganadera con labranza convencional y rotación agrícola con labranza reducida y del 63% en la rotación agrícola con labranza convencional.

La labranza afecta la acumulación y distribución de materia orgánica en el perfil. Aquellos sistemas de labranza que producen mínima remoción superficial del suelo (e.g. siembra directa, laboreos reducidos que incluyen el pasaje de herramientas de labranza vertical), provocan un incremento de la materia orgánica de la capa superficial, observándose una estratificación de la misma debido al aporte gradual que realizan los restos orgánicos que yacen en superficie. Este comportamiento impacta directamente sobre la estabilidad de la estructura y en la distribución de tamaños de agregados estables (Figura 4.39).

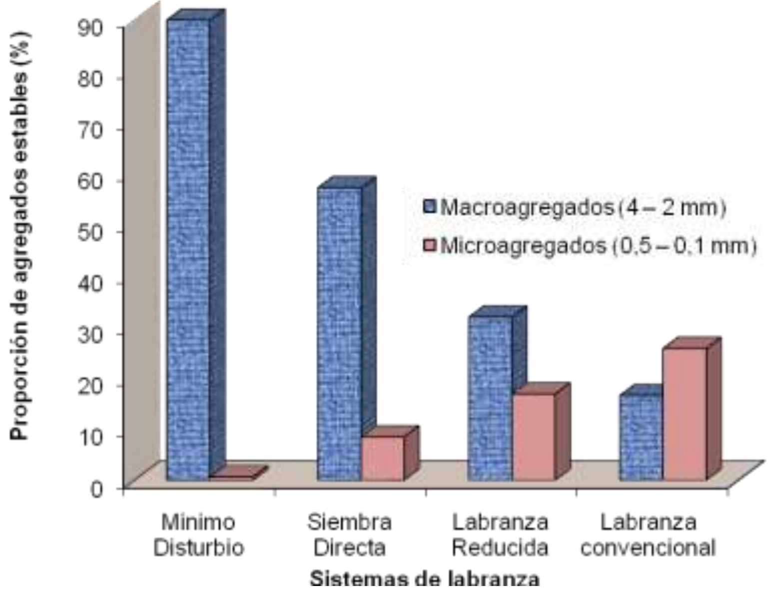


Figura 4.39: Proporción de tamaños de agregados estables en diferentes sistemas de labranza de una rotación agrícola soja-maíz y en la situación con mínimo disturbio, en Hapludol típico del sur de Córdoba (adaptado de Velázquez, 2011 y Peralta, 2011).

Los sistemas de labranza con mínima remoción superficial tienden a formar una mayor proporción de macroagregados y menor proporción de microagregados, respecto a la labranza convencional, debido a la elevada intensidad de remoción de suelo que produce este último sistema. Este comportamiento puede relacionarse con el incremento de materia orgánica en los primeros centímetros del suelo en sistemas de labranza conservacionistas, respecto a sistemas de labranza convencional, según lo informado por Lardone (2009), lo que expresaría menor susceptibilidad a pérdidas de suelo por erosión (mayor agregación y menor predisposición para el desprendimiento de partículas).

En relación a ello, Chagas (1995) evaluó el efecto de la rugosidad superficial, el tamaño de agregados y la estabilidad estructural sobre la erosión laminar en dos condiciones de degradación estructural de un Argiudol tipico de Marcos Juarez, Argentina: degradado (agricultura continua durante 15 años) y no degradado (rotación agrícola-ganadera con dos ciclos de pastura de 5 años de duración) y dos condiciones de rugosidad superficial: lisa y rugosa. Los resultados indicaron que la presencia de agregados grandes en superficie (cama rugosa) disminuyó en un 70% y 68% el escurrimiento superficial y la erosión, respectivamente, en comparación con la superficie lisa, mientras que la estabilidad estructural no tuvo un efecto muy sobresaliente ya que una diferencia de 63% en el nivel de degradación de los suelos,, sólo redujo un 25% el volumen de escurrimiento y no afectó la pérdida total de suelo.

El mismo autor sostiene que el manejo de la rugosidad superficial a través del incremento en el tamaño de los terrones en la capa de labranza, retarda la formación de sellos y costras superficiales, tanto en la condición de suelo degradada como en la no degradada. Plantea además, que la generación de rugosidad podría facilitar el pasaje de agua a partir de la generación de caminos preferenciales entre los terrones, lo que incrementa la velocidad de infiltración siendo esto, al menos en parte, responsable del control de las pérdidas de suelo.

Haciendo referencia al efecto de las distintas rotaciones de cultivos sobre la infiltración de agua en el suelo, Liebig *et al*., (2004) y Blanco *et al*., (2010) concuerdan que aquellas rotaciones más intensivas, con mayor cantidad de cultivos en el año, tuvieron tasas de infiltración estadísticamente más elevadas que aquellas rotaciones en donde luego de la cosecha de un cultivo seguía un período de barbecho mecánico para acumular agua y controlar malezas. Así mismo observaron que en el sistema de labranza convencional la tasa de infiltración fue estadísticamente menor que en siembra directa. Esta mayor infiltración se alude a una mayor protección física de la superficie del suelo como así también, a un incremento del carbono orgánico del suelo y los beneficios que esto genera.

Yimer *et al*., (2008) en un Andisol de Etiopia, estudiaron el efecto de tres usos de la tierra: agrícola, ganadero-pastoril y forestal, sobre la velocidad de infiltración e infiltración acumulada, encontrando diferencias significativas entre ellos, (Tabla 4.4). Estas diferencias son atribuidas a la compactación y a la degradación estructural en superficie, que traen aparejada la pérdida de macroporosidad.

Tabla 4.4: Tasa de infiltración (cm/min) e Infiltración acumulada (cm) en el suelo en relación al uso en 1 min (inicial) y 60 min (final) (adaptado de Yimer *et al*., 2008).

Tiempo (min)	Tasa de infiltración (cm/min) (media ± error estándar)		
	Usos del suelo		
	Agrícola	Ganadero pastoreado	Forestal
01	0.67 ± 0.02 b	0.61 ± 0.09 b	2.67 ± 0.66 a
60	0.14 ± 0.03 b	0.16 ± 0.01 b	0.50 ± 0.08 a
	Infiltración Acumulada (cm) (media ± error estándar)		
	Agrícola	Ganadero pastoreado	Forestal
60	14.63 ± 1.99 b	12.98 ± 0.91 b	45.72 ± 6.31 a

Cultivos de cobertura

Son cultivos que se instalan en el periodo de barbecho entre dos cultivos de cosecha con el objetivo de mantener cobertura, incorporar carbono al suelo, evitar la pérdida de nutrientes móviles, mejorar la eficiencia del uso del agua y disminuir los riesgos de erosión.

Desde el punto de vista físico, disminuyen la energía cinética de la gota de lluvia, como así también brindan estabilidad al suelo a través de su sistema radical y por el aporte de carbono orgánico a través de la biomasa aérea. Resultan una alternativa de manejo interesante en ambientes con precipitaciones que se concentran en un período del año y presentan elevada intensidad y, que generan desestabilización de la estructura superficial, escurrimiento y procesos de erosión hídrica.

Gramíneas de invierno tales como centeno (Secale cereale), avena (Avena sativa) o raigrás anual (Lolium multiflorum) son utilizadas como cultivos de coberturas para la protección de los suelos contra la erosión debido a su elevada acumulación de

biomasa y podrían incluirse entre cultivos consecutivos de soja para incrementar los aportes de carbono orgánico a los sistemas productivos y así contribuir al mantenimiento de la materia orgánica del suelo, (Wander y Traina 1996, Ding *et al*., 2005).

Varios autores estudiaron el efecto de los cultivos de cobertura sobre diferentes propiedades del suelo y rendimiento del cultivo posterior. Alvarez *et al*. (2009) después de 4 años de efecto acumulado de la utilización de triticale como cultivo de cobertura, evaluaron el impacto de diferentes momentos de secado sobre las propiedades hídricas del suelo, y hallaron que la infiltración acumulada varió entre 315 y 174 mm h^{-1}, comprobándose diferencias significativas entre tratamientos respecto a la situación con monocultivo de soja, que presentó la menor magnitud de esta variable, sólo después de 4 hs de evaluación, (Figura 4.40). Atribuyeron este comportamiento al efecto de protección mecánica que ejercieron los tratamientos de cultivo de cobertura, que evitaron la formación de sellos superficiales, ya que no hubo cambios significativos en la distribución de tamaños de agregados.

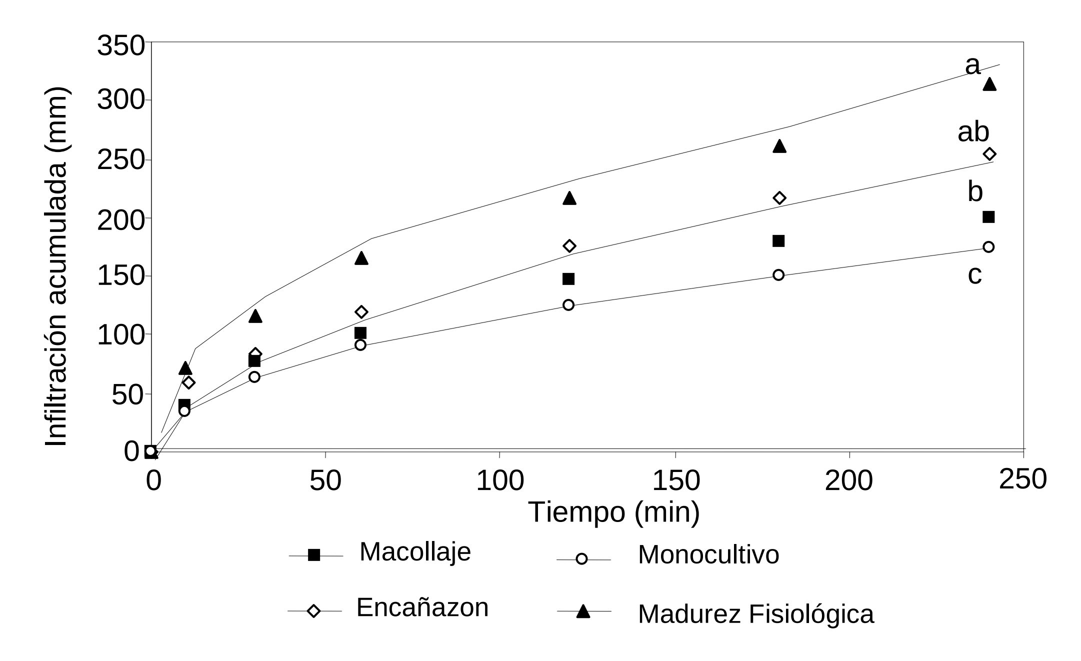


Figura 4.40: Infiltración acumulada después de 4 años de efectos acumulados de inclusión de cultivos de cobertura (triticale) secados en diferentes momentos. Diferentes letras en sentido vertical muestran diferencias significativas entre tratamientos para un mismo tiempo acumulado (Tuckey $p<0.05$) (Alvarez *et al*., 2009).

La elección del cultivo de cobertura correcto para cada área y manejo dependerá del objetivo perseguido. La cantidad de residuo y cobertura generados dependerá de la especie elegida, del momento de secado y del agua disponible para su crecimiento, entre otros factores.

En relación a la protección contra los agentes erosivos se deben seleccionar especies de rápido cubrimiento del suelo y que aporten abundante biomasa aérea y radicular para el mejoramiento de la estabilidad de la estructura.

La decisión en cuanto al momento óptimo de secado del cultivo de cobertura es especialmente importante en zonas áridas y semiáridas debido a la necesidad de encontrar un equilibrio entre la cobertura que genere el cultivo y la cantidad de agua que deje en el perfil para el próximo cultivo.

Enmiendas cálcicas

El uso de yeso como enmienda cálcica podría ser apropiado para favorecer la agregación por su acción floculante (Singer y Warrington, 1992); de esta manera se producen mejoras en el comportamiento hidrológico de los suelos, por un aumento en la estabilidad del espacio poroso produciendo incrementos en la velocidad de infiltración.

Irurtia *et al*., (2008) en un Argiudol típico, evaluaron el efecto conjunto de la aplicación de yeso y la descompactación mecánica sobre la perdurabilidad de la estructura porosa del suelo que permitiera mantener valores elevados de velocidad de infiltración a lo largo del tiempo. Utilizaron un prototipo para labranza construido sobre la base de un equipo Culti-vie® para descompactar y aplicar yeso granulado simultáneamente con cada púa del subsolador, a razón de 500 kg/ha, en bandas de 5 cm de ancho separadas a 70 cm, generando una dosis por banda de 7 t/ha, que penetró en el suelo desde la superficie hasta los 30 cm de profundidad. Observaron que aún después de 6 años de haberse realizado el subsolado se detectaban efectos residuales favorables en el suelo sobre la resistencia a la penetración y en particular sobre la velocidad infiltración (Tabla 4.5).

Tabla 4.5: Velocidad de infiltración luego de 6 años de aplicación de diferentes tratamientos de descompactación subsuperficial y enmienda cálcica (Irurtia *et al*., 2008).

Velocidad de Infiltración (mm/h)	Subsolador + yeso año 2008	Subsolador Año 2008	Testigo año2008	Testigo Año 2001
Infiltración Media	138,5a	74,6b	69,5b	30,5
Infiltración Final	78,0a	32,0b	31,5b	10,0

4.3.3. Homogenización de la condición física del suelo y disminución de la compactación por tránsito

Laboreos de descompactación de costras o sellos

El manejo de sellos o costras superficiales es diferente al de las impedancias que se encuentran a mayor profundidad. La prevención de la formación de estas impedancias se basa en los principios fundamentales de protección mecánica de la superficie y en el incremento de la estabilidad de la estructura, discutidos en este capítulo.

El manejo de este tipo de impedancias, puede realizarse con operaciones de labranza secundaria y de postemergencia dependiendo del momento en que se produzca el sellado superficial en relación a la implantación del cultivo. Las labores con rastras doble acción, de dientes, rotativas tienen el objetivo de romper las costras y generar rugosidad superficial, llevando suelo húmedo a superficie, controlando, al menos en el corto plazo, el riesgo de erosión tanto hídrica como eólica.

Como constituyen laboreos de emergencia, es necesario analizar la oportunidad de aplicación y considerar, que al generar mezclado del suelo, producir enterramiento del rastrojo y ruptura de terrones y/o provocar una densificación por debajo de la profundidad de pasaje de la herramienta, dejan a la superficie edáfica expuesta a nuevos procesos erosivos.

Los aspectos operativos a tener en cuenta son la dirección, profundidad, velocidad de trabajo, ángulo de ataque de los órganos activos de la herramienta, entre otros. La dirección debe ser perpendicular a la de la pendiente del terreno, de modo que la rugosidad producida incremente los procesos de detención y retención superficial. La profundidad debe abarcar el espesor del sello o costra y si hay un cultivo implantado se debería considerar la profundidad de enraizamiento del mismo de modo de generar la menor poda de raíces posible. La velocidad de trabajo y el ángulo de ataque deben ser regulados en función del implemento a utilizar, de manera que genere condiciones de rugosidad, produciendo el menor grado de enterramiento de rastrojos que hubiera en superficie y de desintegración de agregados.

Laboreos de descompactación de impedancias superficiales y subsuperficiales

Para aliviar los inconvenientes que generan este tipo de compactaciones por tránsito y trabajo de maquinarias, las herramientas comúnmente utilizadas son los escarificadores, cultivadores de campo, o cinceles cuando las impedancias son superficiales y subsoladores cuando son subsuperficiales.

El objetivo de este tipo de labores es disminuir la densidad aparente de capas compactadas y generar condiciones físicas homogéneas para la exploración radicular y el movimiento de agua y aire.

En un ensayo de larga duración realizado en Haplustoles enticos del centro sur de Córdoba, muy degradados desde el punto de vista físico, Uberto *et al*., (2001) evaluaron la tendencia en la velocidad de infiltración final, medida con doble anillo, en tres sistemas de labranza, y observaron que el laboreo reducido que incluía una labor de descompactación, mostraba una mayor velocidad de infiltración que el laboreo convencional y siembra directa (Figura 4.41).

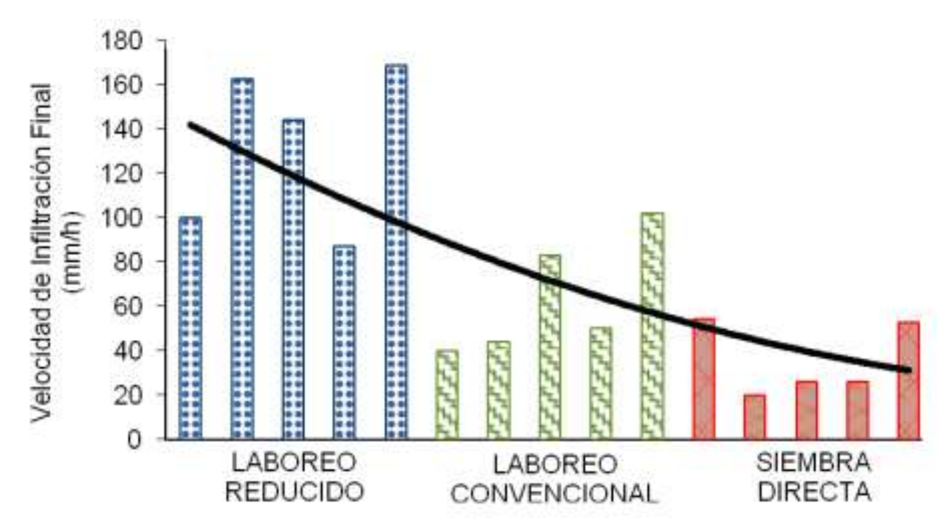


Figura 4.41: Tendencia en la velocidad de infiltración final de un Haplustol entico manejado con tres sistemas de labranza (Uberto *et al*., 2001).

En el mismo sentido, Marelli *et al*., (2006) en Argiudoles típicos de Marcos Juarez, en ensayos con simulador de lluvia, evaluaron el efecto de diferentes operaciones de laboreo sobre el escurrimiento y las perdidas de suelo por erosión (Figuras 4.42 y 4.43, respectivamente). La introducción de labores de descompactación subsuperficial disminuyó notablemente el escurrimiento superficial al mejorar la condición de permeabilidad del suelo, y con ello disminuyó la pérdida de suelo.

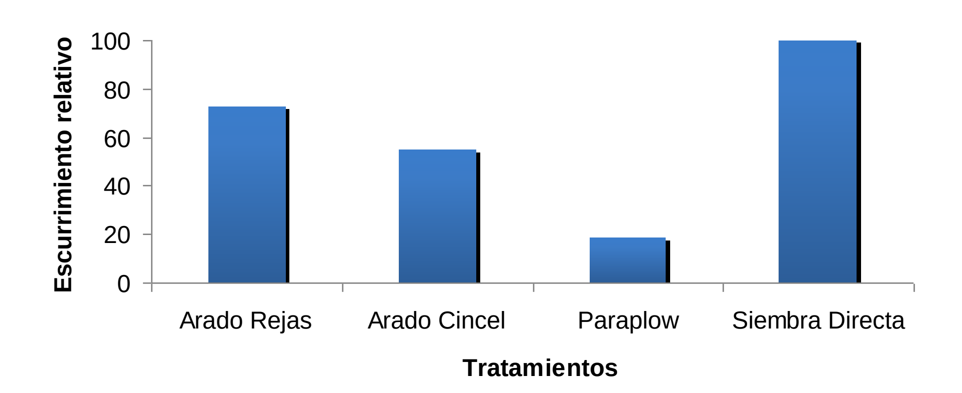


Figura 4.42: Escurrimiento relativo (%) en relación a diferentes operaciones de labranza. Adaptado de Marelli *et al*.(2006).

El efecto de protección que genera la cobertura de rastrojos en un planteo de siembra directa, así como en sistemas de laboreo reducido con operaciones de descompactación con cincel y especialmente con descompactadores subsuperficiales como paraplow®, que dejan un elevado porcentaje de rastrojo en superficie, actúan disminuyendo el poder erosivo de la gota de lluvia y del agua de escurrimiento, por lo que en siembra directa, se produce pérdida de agua pero no pérdida de suelo (Figuras 4.42 y 4.43).

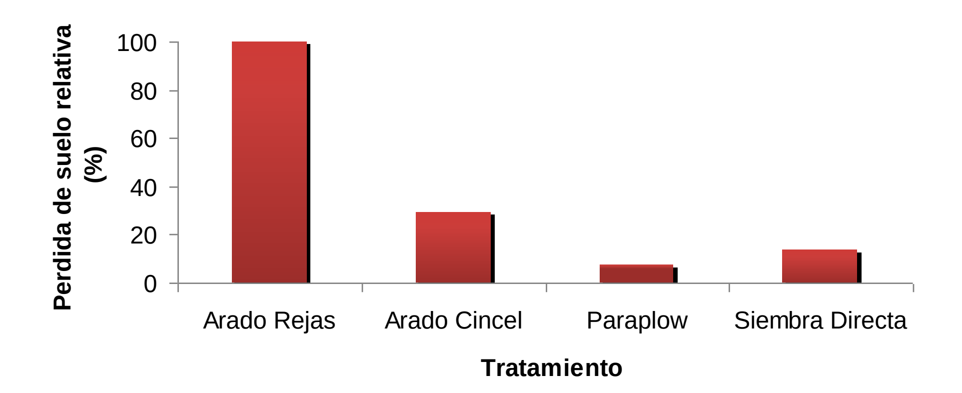


Figura 4.43: Pérdida de suelo relativa (%) en relación a diferentes operaciones de labranza. Adaptado de Marelli *et al*.(2006).

En condiciones de humedad adecuada, la acción que realizan estos equipos es de fragmentación de la capa densificada debido a que generan fuerzas de tensión sobre el suelo. El órgano activo de la herramienta somete al suelo a una presión a la que este ofrece una resistencia. Superada dicha resistencia el suelo estalla, se fractura y desagrega moviéndose en forma lateral y ascendente (Balbuena *et al*., 2009). Spoor *et al*. (2003) plantean que la labor de descompactación debe “fisurar sin aflojar” al suelo, es decir generar grietas, dejando la masa de suelo entre grietas lo más intacta posible, permitiendo que la capacidad de soporte del suelo sea mantenida. Este tipo de fractura se puede obtener sometiendo al suelo a una tensión, la cual puede ser producida mediante una reja subsuperficial que hace que el suelo inmediatamente por encima de ella se flexione, se eleve y se fracture (Figura 4.44). Los implementos mas adecuado para cumplir este objetivo son los subsoladores con rejas de diseño alado (i.e. rejas tipo pata de ganso, escardillo grande y alada convencional).

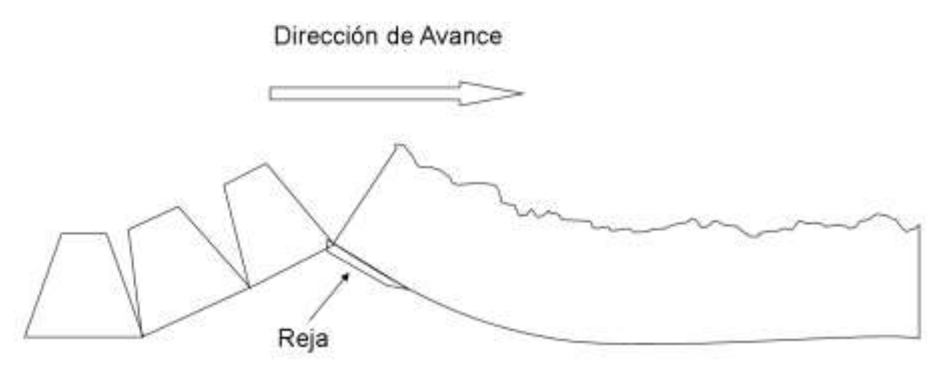


Figura 4.44: Patrón de fisuramiento por tensión y elevación del suelo. Adaptado de Spoor *et al*. (2003).

Al evaluar la decisión de realizar un trabajo de descompactación es necesario considerar los efectos que ejercen sobre la eficiencia de este tipo de labores, la humedad al momento de la labor, la textura edáfica, la profundidad de trabajo, la geometría de la herramienta, entre otros.

Spoor y Godwin, (1978) platean el concepto de "profundidad critica", para definir a la profundidad a partir de la cual cambia el modo en que el suelo fractura. Por encima de esa profundidad el suelo es desplazado hacia adelante, arriba y lateralmente, bajo un patrón de roturación denominado fracturamiento o falla creciente**,** rompiéndose a lo largo de planos definidos que se propagan desde la reja hacia la superficie con un ángulo aproximado de 45º con respecto a la horizontal. Por debajo de la profundidad crítica el suelo se desliza hacia adelante y lateralmente, bajo un patrón de fracturamiento lateral, y en este sector se compacta (Figura 4.45).

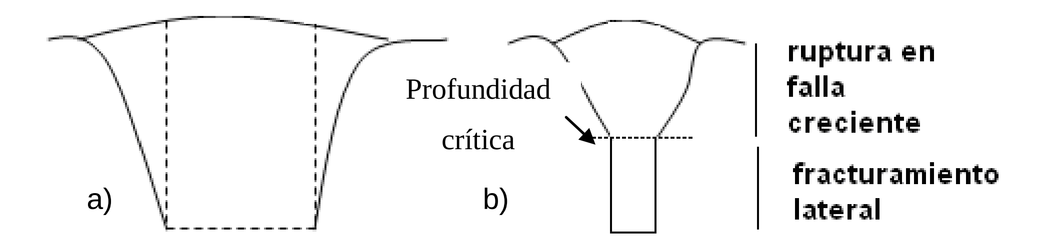


Figura 4.45: Modo de falla o ruptura del suelo, a) en falla creciente, b) en fracturamiento lateral.

La ruptura debe ser en falla creciente y por la tanto la profundidad crítica define la máxima profundidad de trabajo de las rejas de los implementos utilizados para las labores de descompactación.

En términos generales, la profundidad crítica disminuye con el incremento en el contenido de agua del suelo al momento de la labor, con el aumento en el contenido de arcilla y con la reducción en el ancho de la herramienta.

Cuando se evalúa la posibilidad de realizar este tipo de labores, especialmente en suelos con secuencia de horizontes A, Bw, C ó A, Bt, C (i.e. Hapludoles típicos, Argiudoles típicos), en donde el horizonte B presenta un enriquecimiento de arcilla es importante evaluar el estado de humedad al que se encuentra toda la profundidad a trabajar ya que es posible que en el horizonte superficial se produzca un fracturamiento pero en profundidad se genere compactación del suelo. Así mismo, y en relación a la geometría de la herramienta, la adición de rejas aladas a los órganos activos de los implementos de descompactación aumenta la profundidad crítica (Spoor y Godwin, 1978).

Condiciones a tener en cuenta para realizar labranzas de descompactación:

- Profundidad:

Es el parámetro básico de la operación, y junto con la humedad, define el tipo de implemento a utilizar y la potencia requerida. La profundidad se establece a partir del diagnóstico a campo del espesor y características morfológicas de las capas a aflojar. La evaluación del perfil cultural a partir de la metodología que propone Gastroneu y Manichon (1987), constituye una herramienta interesante para evaluar la condición estructural del suelo previo a la labor (Figura 4.46) y definir la profundidad de trabajo, así como también para evaluar el estado de la estructura del suelo posterior a la labranza (Figura 4.47). La profundidad de trabajo debe superar el espesor de la capa densificada y debe ser uniforme en todo el terreno manejado.

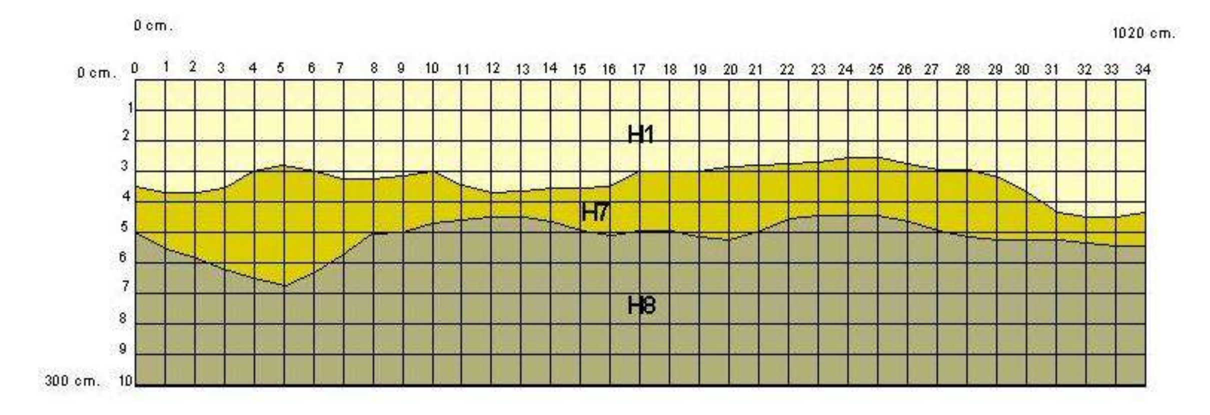


Figura 4.46: Perfil cultural de un Haplustol típico con impedancia mecánica entre los 15-30 cm de profundidad (capa H8). H1 y H7 son capas removidas, no densificadas (Bergesio, 2011).

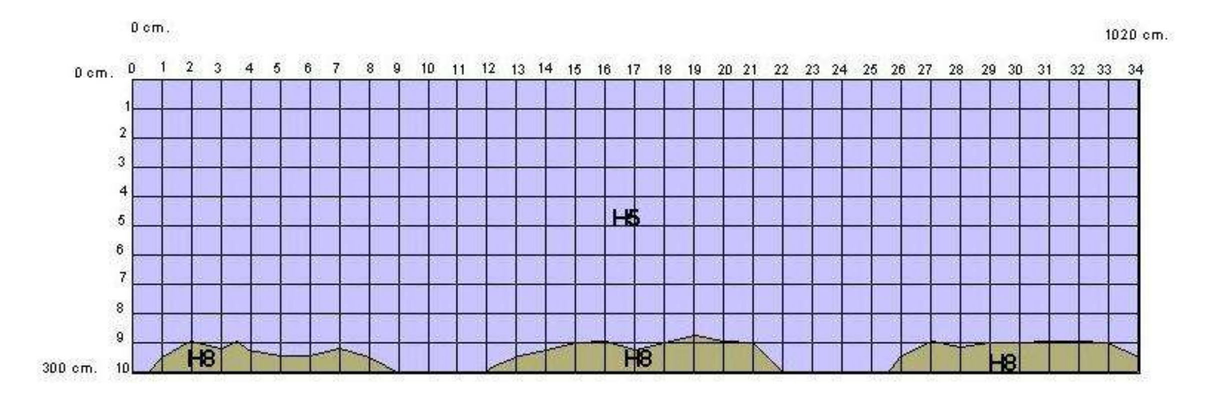


Figura 4.47: Perfil cultural del Haplustol típico posterior a la labor de descompactación. H5 es el espesor del perfil que fue fracturado; H8 son sectores de la capa densificada que no fueron alcanzados por la profundidad de trabajo de la herramienta (Bergesio, 2011).

- Humedad óptima:

La consistencia óptima del suelo para este tipo de trabajos mecánicos es cuando se encuentra friable, con un contenido de agua algo inferior al de capacidad de campo. Baver *et al*. (1972) sostienen que la friabilidad es la facilidad para desmenuzarse. Es el estado de humedad que representa la mejor condición para la labranza. La cohesión es baja, existe la humedad suficiente para minimizar el efecto cementante que domina en la consistencia dura y por otro lado no hay agua suficiente para la formación de películas en los contactos entre las partículas y producir la adhesión existente en el estado plástico.

Cholaky (2003) estudió la descompactación de un Haplustol típico del centro de Córdoba y evaluó el efecto de la humedad antecedente, sobre el cambio producido en la densidad aparente (DAP) del suelo. Los niveles de agua fueron 9, 14 y 19 % (g g^{-1}) en la condición de suelo seco (SS), húmedo (SH) y mojado (SM), respectivamente. Observó que la labor realizada en SH, en el que el suelo se encontraba friable produjo la mayor reducción de la DAP al compararla con las labores realizadas en SM y SS y en la labranza con mayor contenido de agua edáfica se produjo compactación en la capa superficial (Tabla 4.6).

Tabla 4.6: Efecto de la humedad antecedente, sobre el cambio producido por la labor de descompactación subsuperficial sobre la densidad aparente de perfil (Cholaky, 2003).

Espesor de la capa (cm)	**MOMENTO**	**CONDICIÓN DE HUMEDAD**		
		SM	**SH**	**SS**
		DENSIDAD APARENTE (Mg.m^{-3})		
0-9	Prelabor	1.17	1.17	1.19
	Postlabor	1.34	1.14	1.18
	Cambio	-0.17 b	0.03 a	0.005 a
9-30	Prelabor	1.47	1.46	1.48
	Postlabor	1.27	1.08	1.19
	Cambio	0.20 b	0.39 a	0.28 b

Letras distintas para un mismo espesor de capa, indican diferencias estadísticamente significativas.

En el espesor de 9-30 cm (impedancia mecánica) los cambios en la porosidad total (PT) y en la macroporosidad (MP), debidos a la labor de descompactación, se detallan en la Tabla 4.7. En la condición de suelo húmedo (SH) el efecto fue significativamente superior al de las restantes situaciones, con las implicancias que ello ocasiona en la porosidad relacionada al flujo de agua y aire.

Tabla 4.7: Efecto de la humedad antecedente, sobre el cambio producido por la labor de descompactación subsuperficial sobre la porosidad total (PT) y macroporosidad (MP) (Cholaky, 2003**)**.

VARIABLES	MOMENTO	CONDICIÓN DE HUMEDAD		
		SM	SH	SS
PT(%)	Prelabor	44,68	44,68	44,68
	Postlabor	52,9	59,48	54,85
	Cambio	**-8,37 a**	**-14,95 b**	**-10,31 a**
MP(%)	Prelabor	16,82	16,82	16,82
	Postlabor	25,19	31,77	27,14
	Cambio	**-8,37 a**	**-14,95 b**	**-10,31 a**

Letras distintas para una misma capa del perfil cultural, indican diferencias estadísticamente significativas.

- Tipo de herramienta:

Este efecto se logra con herramientas de labranza vertical cuyos órganos activos pueden ser curvos o rectos, vibratorios o rígidos. Los órganos activos rectos y rígidos permiten una menor remoción del rastrojo superficial al tener un menor ancho de ataque del suelo, por lo que son los más utilizados en sistemas de laboreo bajo cubierta. Existen diferentes modelos comerciales (Paratill Dolby®, paraplow®, Budassi®, entre otros) y prototipos como el desarrollado por la Universidad Nacional

de Río Cuarto (UNRC), denominado reja-cero®. Tienen la ventaja de un menor requerimiento de tracción que los arados de cincel convencional, una mayor superficie removida y una menor remoción del rastrojo superficial. Estas herramientas vienen con diferentes tipos de rejas, entre ellas las de diseño alado que permiten incrementar la superficie de ruptura del suelo, disminuir los riesgos de trabajar a profundidad crítica y descompactar por fisuramiento o agrietamiento. La colocación de cuchillas circulares delanteras, cortan el rastrojo superficial, facilitando la penetración y evitando atoramientos (Figuras 4.48 a la 4.53).



Figura 4.48: Equipo descompactador con rejas de base ancha tipo escardillo (SECyOT-UNRC).



Figura 4.49: Detalle de reja descompactadora alada con base angosta (SECyOT-UNRC).





Figura 4.50: Prototipo reja-cero® desarrollado por la UNRC (SECyOT-UNRC).



Figura 4.51: Equipo descompactador con montantes curvos (SECyOT-UNRC).



Figura 4.52: Descompactador con reja alada, cuchilla corta rastrojo y rolo emparejador de terreno (SECyOT-UNRC).



Figura 4.53: Prueba del prototipo reja-cero (SECyOT-UNRC).

El ángulo de ataque, definiendo como tal al formado por el ángulo de inclinación del órgano activo con respecto a la horizontal en la dirección de avance, es uno de los aspectos de diseño de mayor importancia. De él dependen la energía requerida para el corte, la roturación del suelo, el grado de deterronamiento, la capacidad de penetración, la elevación del terreno y el desplazamiento y volteo de los residuos de cosecha (Balbuena et. al., 2009). De acuerdo a Godwin (2007), el ángulo de ataque más adecuado para cumplir el objetivo perseguido por este tipo de labores debería ser inferior a 90° y desde el punto de vista de la capacidad de penetración del implemento el ángulo de ataque no debería superar 67°.

El enterramiento de rastrojo en labores con descompactadores similares a la reja cero, varían entre el 6% y el 20% (Bergesio, 2011; Cholaky, 2003); en descompactador tipo paraplow® es del orden del 15% (Erbach *et al*. 1992), dependiendo de la velocidad de trabajo, nivel de humedad antecedente, geometría de la herramienta (i.e. ancho del timón, ángulo de ataque).

Esta variable ejerce un elevado impacto en el manejo del proceso erosivo al modificar la protección física de la estructura superficial ejercida por el rastrojo, aspecto discutido en este capítulo. Así mismo, si se considera que esta operación de labranza puede constituir una labor primaria en un sistema de laboreo reducido, sería esperable que sucesivas labranzas de acondicionamiento de la cama de siembra, reduzcan el porcentaje de cobertura superficial, permitiendo entonces, poder utilizar diferentes alternativas de preparación de la sementera que seguirían ejerciendo protección superficial (Figuras 4.54 a la 4.57).



Figura 4.54: Cobertura aportada por residuos de cosecha de un cultivo de soja previo a una labor de descompactación (SECyOT-UNRC).



Figura 4.55: Cobertura del mismo lote de la Figura 4.54 luego de la labor de descompactación (SECyOT-UNRC).





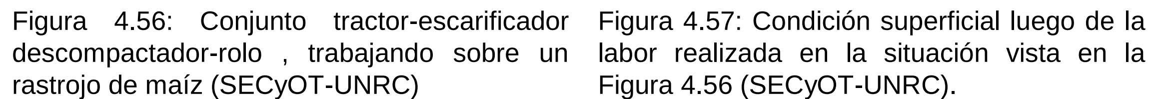


Figura 4.56: Conjunto tractor-escarificador descompactador-rolo , trabajando sobre un rastrojo de maíz (SECyOT-UNRC)

Figura 4.57: Condición superficial luego de la labor realizada en la situación vista en la Figura 4.56 (SECyOT-UNRC).

- Distancia entre púas:

La distancia entre órganos activos es una variable a regular en función fundamentalmente de la profundidad de trabajo, e incide principalmente en la potencia requerida y en la uniformidad alcanzada en el área roturada por un equipo descompactador. Para que se produzca una interacción adecuada entre el área roturada por órganos activos adyacentes, Godwin *et al*. (1984) plantean que la relación entre distanciamiento entre órganos activos y profundidad debe ser del orden de 1,4 ± 25% veces la profundidad de trabajo, y para rejas de diseño alado, según Soomro *et al*. (1982), la relación es 2 veces la profundidad de trabajo.

- Dirección de la labor:

Deberá realizarse en dirección perpendicular a la pendiente o en curvas de nivel, para incrementar los procesos de retención y detención superficial (Capítulo 5).

- Momento de realización:

El momento en el que debiera ubicarse una labor de descompactación dentro de un sistema de laboreo, se relaciona con la posibilidad de aprovechamiento de sus efectos positivos por parte del cultivo a implantar y que los mismos perduren al menos a lo largo de todo el período productivo. En este sentido, Spoor *et al*., (2003) plantean que cuanto más largo es el período de tiempo para que el suelo descompactado logre estabilizarse antes de ser sometido a nuevas cargas, mayor será la posibilidad de recuperar la resistencia del suelo y más permanente la mejora producida.

- Frecuencia de labor:

La frecuencia de este tipo de labranza depende de la duración de los efectos producidos por la misma, los que variarán con la estabilidad de la estructura generada mecánicamente frente a condiciones ambientales, como el humedecimiento-secado y a las características del manejo del suelo y del cultivo posterior a la labor.

La frecuencia de labor guarda relación con los costos, energía requerida, con los efectos generados sobre el comportamiento hidrofísico del suelo y sobre el rendimiento de los cultivos. Los resultados de numerosos trabajos de investigación son diversos en este sentido. En relación a ello, Alvarez *et al*. (2006), sostienen que las

labores de descompactación con implementos tipo paratill pueden generar aumentos inmediatos en la velocidad de infiltración debido a la ruptura de poros planares, sin embargo esta mejora suele ser de corto plazo y ello se debe a que las fisuras mecánicas creadas por la descompactación poseen escasa estabilidad.

Un mecanismo complementario en este sentido es el efecto de las raíces de cultivos, especialmente de gramíneas, que por las características de su sistema radical generan un entramado estabilizador de la nueva estructura producida con la intervención mecánica. En tal sentido, es necesario evaluar el momento de realización de la descompactación en relación al cultivo que ocupará el terreno dentro la secuencia que constituye la rotación.

Así también, el aporte de enmiendas cálcicas constituye una alternativa complementaria para incrementar la perdurabilidad de los efectos producidos por este tipo de labores (Irurtia *et al*., 2008).

Control del tránsito de equipos agrícolas

Hakansson y Reader (1994) afirman que cuando el tránsito se realiza en condiciones de suelo mojado, recién arado, es esperable que se produzca compactación hasta los 30 cm cuando el peso/eje es de 4 Mg, hasta 40 cm cuando el peso es de 6 Mg, hasta 50 cm cuando este de 10 Mg y hasta 60 cm o más cuando la carga/eje es de 15 Mg o mayor a este valor, por ello restringir el peso/eje a menos de 6 Mg constituye un método para reducir la compactación subsuperficial de muy difícil reversión, y en caso de generar compactación, esta se produciría en las capas superficiales del suelo, en donde pueden ser manejadas más fácilmente.

Además del peso por eje, resulta conveniente disminuir la presión de inflado del neumático para reducir las presiones en el área de contacto rueda-suelo, seleccionar neumáticos radiales que tienen la cualidad de mantener constante el área de contacto rueda suelo a diferencia de los neumáticos convencionales que se deforman. De acuerdo a Botta *et al*. (2009) los neumáticos radiales ante una misma carga, generan menor compactación superficial que los neumáticos convencionales de similares dimensiones.

Cacchiavillani (2009) en un Haplustol típico franco arenoso comparó la resistencia mecánica del suelo en sectores con y sin transito posterior a una labor de descompactación subsuperficial y observó que el tránsito de la cosechadora a un contenido de humedad por debajo de capacidad de campo (13% $g\ g^{-1}$) fue la operación de labranza que produjo el mayor impacto sobre la recompactación del suelo posterior a la labor, con valores de resistencia mecánica de hasta 2,7 MPa y 1,9 MPa en los primeros 10 cm de suelo transitado y no transitado, respectivamente.

Li *et al*., (2007) en Vertisoles bajo producción extensiva de granos en Australia, estudiaron durante 6 años el impacto del tránsito anual y de la labranza sobre el escurrimiento superficial y observaron que el tránsito tuvo un marcado y superior efecto sobre el volumen de agua escurrida que el sistema de laboreo, el cual ejerció un efecto de menor intensidad. En los sitios donde no hubo tráfico de equipos

agrícolas, es decir donde se controló el tráfico, el escurrimiento anual se redujo un 36,3 % respecto al que se produjo en los sitios transitados. La siembra directa con el 100% de cobertura superficial redujo el escurrimiento superficial en un 15,7%, mientras que la combinación de tráfico controlado y siembra directa generó una reducción del agua escurrida del orden del 47%.

Una alternativa para aliviar la compactación del suelo en la cosecha de los cultivos puede ser el tráfico controlado, el cual se basa en el principio de no transitar sobre el área cultivada, adaptar los equipos y organizar las operaciones de labranza de modo tal que el área cultivada sea dividida en zonas traficadas y en zonas no traficadas (Chamen, 2005).

Botta *et al*. (2007) en un ensayo realizado sobre un Argiudol típico evaluó tres alternativas de tráfico a la cosecha de soja, las cuales se detallan en las Figuras 4.58, 4.59 y 4.60.

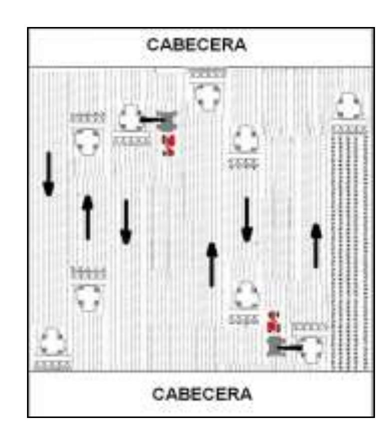


Figura 4.58: (Tratamiento1) El lote fue transitado con vehículos que presentaron los siguientes pesos: 15,55 Mg (cosechadora), 8,5 Mg (FWA tractor) y 20,4 Mg (tolva). Los carros fueron llenados en cualquier sector del lote (Botta *et al*., 2007).

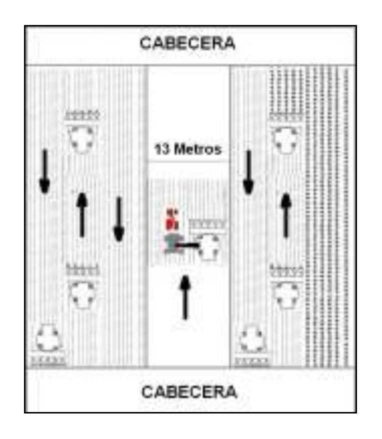


Figura 4.59: (Tratamiento 2) La cosechadora y el carro transportador de granos transitaron a lo largo de los 13 m de la parcela central del lote (Botta *et al*., 2007).

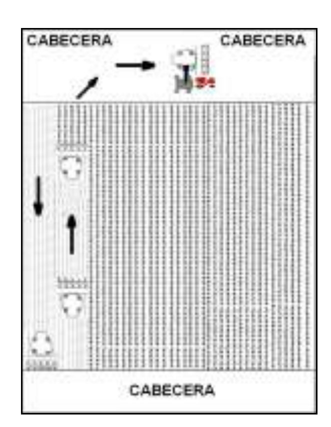


Figura 4.60: (Tratamiento 3) La cosechadora transita a lo largo de la parcela y la descarga se realiza solo en la cabecera (Botta *et al*., 2007).

Los resultados obtenidos indicaron que la cosecha con equipos muy pesados causaron un cambio considerable en la estructura de la capa superficial y subsuperficial, con un incremento de la densidad aparente (DAP) en todos los tratamientos. Sin embargo, durante los tres años de ensayo los tratamientos 1 y 2 presentaron los mayores valores de DAP respecto al tratamiento con menor tránsito y el valor pico de compactación ocurrió progresivamente a mayor profundidad año tras año (Figura 4.61).

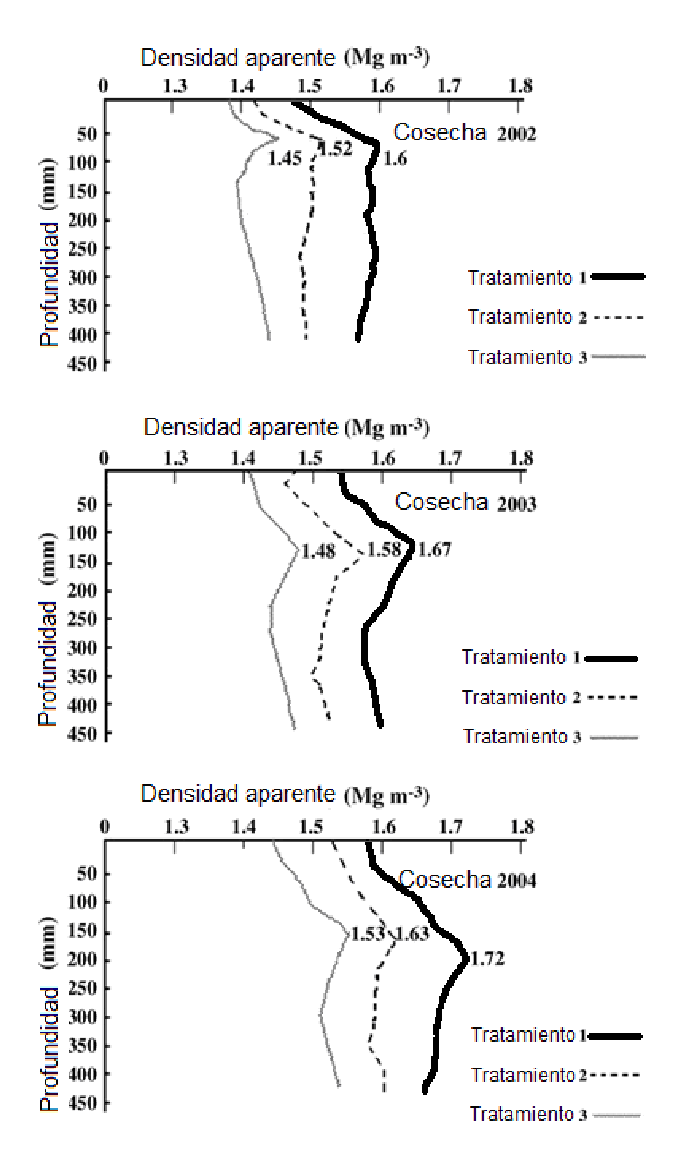


Figura 4.61: Perfil de distribución de densidad aparente en función del tránsito y año de ensayo (Botta *et al*., 2007).

Los incrementos en la DAP se asociaron a reducciones en la porosidad total y por consiguiente a la reducción de la conductividad hidráulica (Tabla 4.8).

Tabla 4.8: Porosidad Total (%) en los primeros 15 cm de suelo estimados en tres años consecutivos luego de la aplicación de los tratamientos de tráfico (Botta *et al*., 2007).

Año	Porosidad Total (%)		
	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3
2002	39.6 c	42.6 b	45.2 a
2003	36.6 c	40.3 b	44.1 a
2004	36.6 c	38.4 b	42.2 a

Letras distintas en una misma fila indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.01$) según test de Duncan.

Manejo del pisoteo y pastoreo animal

En sistemas ganaderos, la magnitud de los procesos de compactación y su impacto sobre la erosión hídrica dependen de factores como el contenido hídrico del suelo, la textura, el sistema de manejo del suelo y la pastura (i.e. sistema de labranza,

fertilización), la carga animal, el tiempo de pastoreo asociado al sistema de pastoreo, de la cobertura generada por la biomasa vegetal superficial, de la estabilización de la estructura a partir del sistema radicular de los pastos, de la estructura de la comunidad vegetal, entre otros.

Autores como Kiessling *et al*. (2006) señalan que el pastoreo genera, en el corto plazo, una pérdida de macroporos en superficie (con implicancia en la infiltración del agua de lluvia) y que dicha pérdida es más importante en labranza convencional que en siembra directa, mostrando éste último sistema una mayor estabilidad en la distribución del espacio poroso, al ser sometido al pastoreo animal directo.

Cabrera *et al*. (2011) en un Hapludol típico franco arenoso muy fino del sur de Córdoba, evaluaron el efecto de la carga animal y del contenido de agua al momento del pastoreo sobre propiedades hidrofísicas del suelo. Compararon cuatro cargas animales que variaron desde 2,30 a 0,57 kg de peso vivo (PV) m^{-2} y dos contenidos de agua del suelo: suelo seco (contenido de agua inferior a capacidad de campo) 11% y suelo húmedo (contenido hídrico superior a la capacidad de campo) con 18% de agua. Las parcelas con mayor contenido de humedad del suelo al momento del pastoreo presentaron valores de velocidad de infiltración inicial y final más bajos que las parcelas pastoreadas con menor contenido de humedad del suelo.

En los tratamientos pastoreados los valores de velocidad de infiltración inicial fueron sensiblemente menores ($p<0,05$) comparados con el testigo no pastoreado, salvo cuando el suelo estuvo seco y las cargas animales fueron bajas (0,85 y 0,57 kg PV m^{-2}). La disminución más importante se produjo cuando la carga animal fue elevada (2,3 y 1,25 kg PV m^{-2}) y el suelo se presentaba húmedo (Figura 4.62).

En relación a la velocidad de infiltración final se observó una tendencia a la disminución cuando el pastoreo se realizó en condición de suelo húmedo y la carga animal aumentó (4.63).

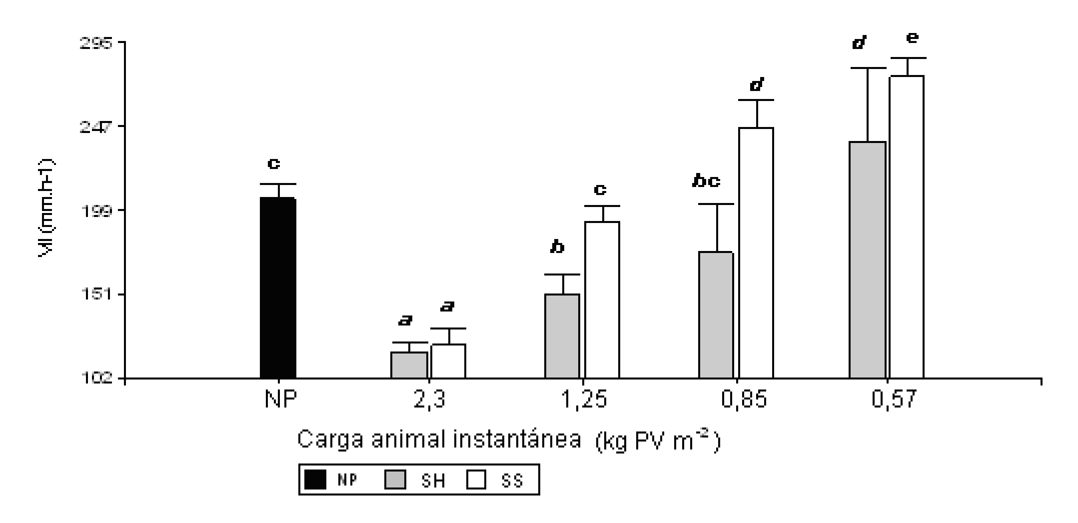


Figura 4.62: Velocidad de Infiltración inicial (VII) en función de la carga animal y el testigo (NP) en suelo húmedo (SH) y suelo seco (SS) (adaptado de Cabrera *et al*., 2011).

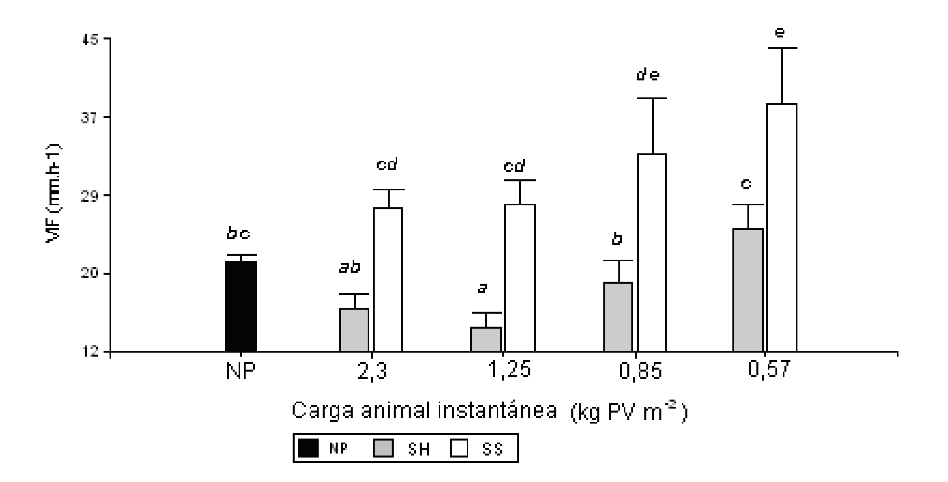


Figura 4.63: Velocidad de Infiltración final (VIF) en función de la carga animal y el testigo (NP) en suelo húmedo (SH) y suelo seco (SS) (adaptado de Cabrera *et al*., 2011).

4.4 Síntesis

La infiltración de agua en el suelo es un proceso hidrológico fundamental en la economía del agua y en la preservación del ambiente contra la erosión hídrica. Es una válvula que regula el agua almacenada en el suelo entre los aportes superficiales y las perdidas de agua, especialmente por escurrimiento.

Tanto las condiciones de superficie como internas del suelo influyen sobre la velocidad de infiltración. La ausencia de cobertura superficial y la presencia de impedancias mecánicas superficiales y subsuperficiales incrementan la susceptibilidad de las tierras a erosión hídrica debido a la desintegración de la estructura superficial por el impacto directo de las gotas de lluvia y al transporte de partículas por el escurrimiento sobre el terreno, una vez que la intensidad del aporte (i.e. precipitación, riego) supera a la velocidad de infiltración de agua en el suelo.

Las técnicas de manejo de la velocidad de infiltración se basan en los siguientes principios fundamentales: protección mecánica de la superficie, incremento de la estabilidad estructural, homogenización de la condición física interna del suelo y disminución de la compactación por tránsito. Diferentes alternativas tecnológicas basadas en ellos se sintetizan en la Figura 4.64.

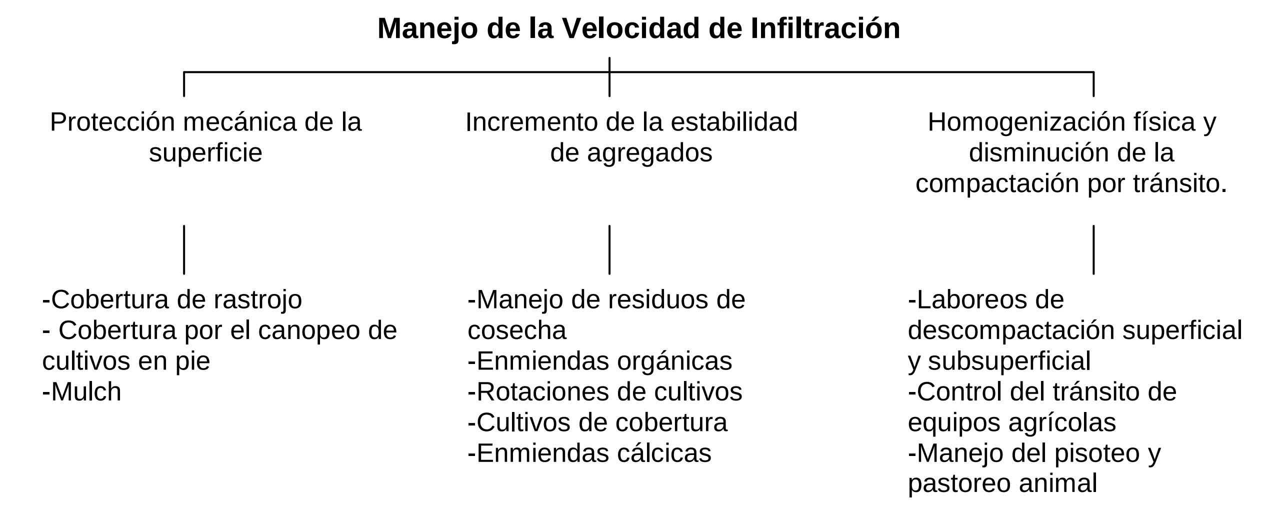


Figura 4.64: Principios y técnicas de manejo de la velocidad de infiltración.

Bibliografía

Alvarez, C.R.; M.A. Taboada; C. Bustigorri y F.H. Gutierrez Boem. 2006. Descompactación en suelos en siembra directa: Efectos sobre las propiedades físicas y el cultivo de maíz. Ci. Suelo (Argentina) 24:1-10.

Álvarez, C.; C. Scianca; M. Barraco y M. Díaz-Zorita. 2009. Contribución de los cereales invernales a la estructura del suelo en sistemas bajo siembra directa. III Taller de física del suelo (AACS), Río Cuarto, Córdoba, Argentina (en CD).

Alvarez, R. y H. Steinbach. 2006. Factores climáticos y edáficos reguladores del nivel de materia orgánica. En: Alvarez R (Coordinador). Materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos. Editorial Fac. de Agronomía UBA. Buenos Aires, Argentina. 205 pp.

Aoki, A.M. y R. Sereno. 2006. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. http://www.scielo.org.ar/ scielo.php?script=sci_arttext,pid=S1668-298X2006000100004,lng=es,nrm=iso. Consultado el 7/3/12.

Balbuena, R.H.; G.F. Botta y E.R. Rivero. 2009. Herramientas de Labranza para la descompactación del suelo agrícola. Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires, Argentina. 205 pp.

Baver, L.D.; W.H. Gardner y W.R. Gardner. 1972. Física de suelos. UTEHA - México. 529 pp.

Bergesio, L. 2011. Persistencia del aflojamiento producido por una labor de descompactación en un sistema de producción mixto en un Haplustol típico del sur cordobés. Tesis de grado, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.

Blanco, H. y R. Lal. 2010. Principles of soil conservation and management. Springer. USA. 617 pp.

Botta, G.F.; D. Jorajuria; R. Balbuena; M. Ressia; C. Ferrero; H. Rosatto y M. Tourn. 2006. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (Helianthus annus L.) yields. Soil Till. Res. 91:164–172.

Botta, G.F.; O. Pozzolo; M. Bomben; H. Rosatto; D. Rivero; M. Ressia; M. Tourn; E. Soza y J. Vazquez. 2007. Traffic alternatives for harvesting soybean (Glycine max L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. Soil Till. Res. 96:145–154.

Botta, G.F.; M.C. Tourn; J.M. Vázquez y E.R.D. Rivero. 2009. Compactación del suelo por la maquinaria: influencia del peso, el neumático y la presión de inflado. III Taller de física del suelo (AACS), Río Cuarto, Córdoba, Argentina (en CD).

Botta, G.F.; D. Jorajuria y L. Draghi. 2002. Influence of de axel load, tyre size and conFiguration, on the compactation of a freshly tilled clayey soil. J. Terramech. 39(1): 47-54.

Botta, G.F.; D. Jorajuria; L. Draghi y D. Dagostino. 2000. Distribución de la compactación inducida por el tráfico agrícola en un sistema frutícola. En: Avances de ingeniería agrícola. Ed. FAUBA. 104-110.

Bronick, C.J. y R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. Geoderma 124:3 –22.

Cabrera, F.S.; C Cholaky y A. Becker. 2011. Propiedades hidrofísicas de un Hapludol típico de Córdoba en relación al pisoteo animal. Ci. Suelo (Argentina) 29(2): 141-150

Cacciavillani, M. 2009. Evolución del comportamiento de un suelo Haplustol típico de Córdoba bajo dos sistemas de laboreo. Tesis de grado. Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.

Canarache, A. 1991.Factors and indices regarding excessive compactness of agricultural soils. Soil Till. Res.19:145-164.

Chamen, W.C.T. 2005. Controlled traffic farming—its benefits and realization. En: D Jorajuria (Ed.), Trafficked Agricultural Soil Reology—Physical Mechanics Soil Changes Related to Compaction Due to Agrarian Traffic. Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

Chagas, C. 1995. Efectos de la rugosidad superficial, el tamaño de los agregados y la estabilidad estructural sobre la erosión entre surcos en un Argiudol. Ciencia del Suelo 13 (2): 85-90.

Chagas, C.; C. Irurtia; J. Thisted; O.J. Santanatoglia; M.J. Massobrio; M.G. Castiglioni; A. Buján. 2004. Movimiento horizontal y vertical de agua y partículas en un Argiudol bajo siembra directa. Ciencia del Suelo 22 (2): 114-119.

Cholaky, C. 2003. Efectividad y persistencia de una labor de descompactación subsuperficial en función de la compactación y humedad antecedentes. Tesis Magister, Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

Clarín.com. 2008. Cómo son los granos del futuro. http://edant.clarin.com/suplementos /rural/2008/03/01/r-01618258.htm. Consultado el 4/4/12.

Cisneros, J.; J.J. Cantero y A. Cantero.1999. Vegetation, soil hidrophysical properties, and grazing relationships in saline-sodic of Central-Argentina. Canadian J. Soil Sci.:399-409.

Cisneros, J.; C. Cholaky; E. Bricchi; O. Giayetto y J.J. Cantero. 1997. Efectos del uso agrícola sobre propiedades físicas de un Haplustol tipico del centro de Córdoba. Rev. UNRC 17(1): 13-22.

De La Vega, G.; M.G. Castiglioni; M.J. Massobrio; C.I. Chagas; O.J. Santanatoglia, C. Irurtia 2004. Infiltración en un Argiudol vertico bajo siembra directa en condiciones variables de cobertura humedad inicial. Ciencia del Suelo 22 (1): 52-55.

Díaz-Zorita, M. y G.A. Grosso. 2000. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. Soil Till. Res. 54: 121-126.

Gautronneau y H. Manichon. 1987. Guide methodologique du profil cultural. Cerefgeara, 71 pp.

Gerster, G.; G. Cordone; F. Martinez; F. Savagiotti; S. Bacigaluppo; R. Pagani; A. Andriulo y C. Sasal. 2005. Monitoreo de indicadores de sostenibilidad en los sistemas reales de producción agrícola del área de Oliveros. EEA INTA, Argentina.

Glamuzina, J.J. 2008. Evaluación de la compactación edáfica causada por el tránsito bajo siembra directa en función del contenido hídrico del suelo. Tesis de grado. Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 51 pp.

Godwin, R.J.; G. Spoor y M.S. Soomro. 1984. The effect of tine arrangement on soil forces and disturbance. J. Agric. Engng. Research, 30: 47-56.

Grande, J.D.; K.G. Karthikeyan; P.S. Miller y J.M. Powell. 2005. Residue level and manure application timing effectson runoff and sediment losses. J. Environ. Qual., Vol. 34:1337-1346.

Hakansson, I. y R.C. Reeder. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load – extent, persistence and crop response. Soil Till Res 29(2–3):277–304.

Hakansson, I.; Voorhees y H. Riley. 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in diferent traffic regimes. Soil Till. Res. 11: 239-282.

Hakansson, I. 1994. Subsoil compaction caused by heavy vehicles. A long-term threat to soil productivity. Soil Till Res. 29: 105-110.

Howard, R.F.; M.J. Singer y GA Frantz. 1981. Effects of soil properties, water content, and compactive effort on the compaction of selected California forest and range soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 231-236.

Irurtia, C.B.; R. Mon; N. Gonzalez y J. Elisei. 2008. Efectos físicos residuales en un argiudol típico después de seis años de subsolado en condiciones de tránsito agrícola no controlado. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis, Argentina.

Kay, B.D. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. Adv. Soil Sci. 12: 1-52.

Kézdi, Á. 1980. Soil testing. Handbook of Soil Mechanics. Elsevier, Vol. 2. 258 pp.

Kiessling, R.J.; J.A. Galantini; J.G. Iglesias; H.Krüger y S. Venanzi. 2006. Efecto del pastoreo sobre la distribución del espacio poroso bajo dos sistemas de labranza. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy, Argentina.

Koolen, A.J. y H. Kuipers. 1983. Agricultural soil mechanics. Springer-Verlag. Berlín, 241 pp.

Lardone, A.V. 2009. Estimación de los coeficientes de humificación y mineralización de la materia orgánica en un Hapludol típico de Río Cuarto. Tesis de grado, Univ. Nacional de Río Cuarto, Argentina.

La Seguridad y los medios. 2007. http://segnu.blogspot.com.ar/2007/08/novedades-intersiembra.html. Consultado el 4/4/12.

Li, Y.X.; J.N. Tullberg y D.M. Freebairn. 2007. Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yield. Soil Till. Res. 97: 282–292.

Liebig, M.A.; D.L. Tanaka y B.J. Wienhold. 2004. Tillage and cropping effects on soil quality indicators in the northern Great Plains. Soil Till. Res. 78:131-141.

Marelli, H.J.; J.M. Arce y M.E. Zabala. 2006. Conservación sustentable del suelo y el agua. Información para extensión Nº 99. Ediciones INTA, Marcos Juarez, Argentina. 12 pp.

Merrill, S.D.; J.M. Krupinsky y D.L. Tanaka. 2002: Soil coverage by residue in diverse crop sequences under No-till. USDA-ARS. Annual Meeting of ASA-CSSA-SSSA, IN, USA.

Pecorari, C.; A. Andriulo y A Ausilio. 1993. Aptitud físico mecánica de los suelos para el laboreo. II. Efectos de la textura y de la materia orgánica sobre la densidad aparente máxima de algunos suelos de la región pampeana. INTA EEA Pergamino, Publicación técnica Nº 281: 1-16.

Peralta, M. 2011. Estabilidad estructural superficial de un Hapludol tipico del suroeste de Córdoba en una rotación agrícola ganadera con tres sistemas de labranza. Tesis de grado, Univ. Nacional de Río Cuarto, Argentina.

Porta, J.; M. López Acevedo y C. Roquero. 2003. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Ediciones Mundi-Prensa, 3º edición. Madrid, España. 929 pp.

Primavesi, A. 1982. Manejo ecológico del suelo - La agricultura en regiones tropicales. Editorial El Ateneo, Buenos Aires, Argentina.

Quiroga, A.R.; D.E. Buschiazzo y N. Peinemann. 1998. Management discriminant properties in semiarid soils. Soil Sci. 163: 591-597.

Raper, R.L. 2005. Agricultural traffic impacts on soil. J Terramech. 42 : 259–280.

Raper, R.L; A.C. Bailey; E.C. Burt; T.R. Way y P. Liberati. 1995. The effects of reduced inflation pressure on soiltire interface stresses and soil strength. J. Terramech. 32 (1):43–51.

Roth, C.H. 1985. Infiltrabilität von Latossolo-Roxo-Böden in Nordparaná, Brasilien, in Feldversuchen zur Erosionskontrolle mit verschiedenen Bodenbearbeitungs-systemen und Rotationen. Göttinger Bodenkundliche Berichte. 83:1 -104.

Singer, M.J. y D.N. Warringtone. 1992. Crusting in the Western United Satates. En: ME Sumner , BA Stewert (eds.). Soil Crusting Chemical and Physical Processes. Lewis Publishers. E.E.U.U.

Soane, B.D. 1990. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. Soil Till. Res. 16:179-201.

Soomro, M.S.; R.J. Godwin y G. Spoor. 1982. Appropriate tine arrangement for better tillage and efficient tool performance. Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America, págs. 21-26.

Spoor , G.; F.G.J. Tijink; , P. Weiss kopf. 2003. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. Soil and Till. Res. 73:175-182.

Spoor, G. y R.J. Godwin. 1978. An experimental investigation into deep loosening of soil by rigid tines. J. Agric. Engng. Res. 23:243-258.

Taboada, M.A. 2010. Influencia de la textura y la estructura sobre la fertilidad física En: Fertilidad de Suelos. Caracterización y Manejo en la región pampeana. Alvarez, R; G Rubio; C Alvarez; , R Lavado (Eds.) Editorial Facultad de Agronomía UBA, Buenos Aires, Argentina. 423 pp.

Taboada, M.A. 2008. Influencia de la textura y la estructura de los suelos sobre la fertilidad física. En: Fertilidad Física de los Suelos. Taboada, A; , C Alvarez (Eds.) Editorial Facultad de Agronomía UBA, Buenos Aires, Argentina.237p.

Taboada, M.A.; O.A. Barbosa; M.B. Rodríguez; D.J. Cosentino. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. Geoderma 123:233-244.

Torbert, H y D. Reeves. 1995. Traffic and residue management systems: effects on fate of fertilizer N in corn. Soil Till. Res. 33:197-213.

Uberto, M.; J. Cisneros; C. Vignolo; C. Cholaky y R Pedelini. 2001. Recuperación de la productividad en tierras del área manisera núcleo. I. Propiedades físicas. XVI Jornada Nacional de Maní, Gral. Cabrera, Córdoba, Argentina. 16-18 pp.

Velazquez, J. 2011. Evolución de la estabilidad estructural superficial de un hapludol típico en una rotación agrícola con tres sistemas de labranza. Tesis de grado, Univ. Nacional de Río Cuarto, Argentina. 30 pp.

Yimer, F.; I. Messing; S. Ledin , A. Abdelkadir. 2008. Effects of different land use types on infiltration capacity in a catchment in the highlands of Ethiopia. Soil Use Manage. 24:344-349.

Wander, M.M. y S.J. Traina. 1996. Organic fractions from organically and conventionally managed soils: I. Carbon and nitrogen distribution. Soil Sci. Soc. Am. J. 60:1081-1087.

Capítulo 5:
Técnicas de manejo del relieve

5.1. Introducción

En el Capítulo 4 se analizaron las técnicas agronómicas que permiten incrementar las tasas de infiltración, las cuales deben integrarse adecuadamente con las técnicas de manejo del relieve discutidas en este Capítulo. En el Capítulo 3, se trataron las prácticas de manejo del relieve y sus implicancias en las tasas de erosión estimada mediante los modelos USLE-RUSLE.

Las técnicas de manejo del relieve (también llamadas prácticas de conservación, prácticas estructurales o de sistematización), son un conjunto de técnicas que abarcan desde la simple ordenación de las líneas de cultivo, hasta prácticas muy complejas como la nivelación completa de terrenos muy inclinados, con fines de implementar el uso agrícola. Son técnicas milenarias utilizadas por casi todas las antiguas civilizaciones para realizar sus cultivos, tanto en secano como bajo riego. Ejemplo de estas técnicas son las terrazas de cultivos incaicas, o los arrozales en China bajo bancales en zonas montañosas, o las plantaciones de olivares en terrazas en España.

Las técnicas de manejo del relieve se basan en diferentes principios del ordenamiento hidrológico:

- Acortar la longitud de la pendiente, de modo de reducir la velocidad del escurrimiento o directamente de detenerlo (Capítulo 7);
- Generar microrelieves superficiales que permiten incrementar la retención y el detenimiento superficial del agua en superficie (Capítulo 2), y de ese modo mejorar la captación del agua en el lugar donde cae.
- Atrapar los sedimentos que se mueven con el escurrimiento, por el efecto de “filtro” que pueden tener los residuos en superficie siguiendo líneas en contorno.
- Controlar el movimiento de partículas por el viento (saltación), cuando la dirección de los microrelieves o las fajas de cultivos, cortan la dirección del viento predominante.
- Conducir controladamente los escurrimientos que no pudieron ser manejados por otras técnicas, a lugares predeterminados, sin que causen erosión.

Si bien a escala de lote son técnicas de probada eficacia, en la escala de cuenca, la misma depende del grado de adopción por los productores. Un trabajo reciente (de Prada *et al*., 2011) indica que se requiere en el orden de un 50 % de la superficie de una cuenca sistematizada para obtener una eficacia aceptable en términos sociales, en términos de reducción de escurrimientos o pérdida de suelos.

Las prácticas de manejo del relieve que se analizarán a continuación son las siguientes, en orden de complejidad:

- Cultivos cortando la pendiente;
- Cultivos en curvas de nivel o cultivos en contorno;
- Cultivos en fajas a nivel, cultivos intercalados a nivel;
- Cultivos en terrazas:
    a. de banco o bancales

b. de banco de conservación
c. de absorción o a nivel,
b. de desagüe, de escurrimiento o a desnivel,

Las tres primeras técnicas implican solamente un direccionamiento de las líneas de siembra, en forma perpendicular a la pendiente del lote. En los cultivos en fajas, además, se intercalan cultivos con pastos, o distintos tipos de cultivos. Los cultivos en terrazas implican movimientos de suelo en el lote, de ahí que suelen nombrarse como prácticas estructurales de conservación. Las terrazas de absorción o desagüe se basan en la construcción de pequeños bordos, mientras que las terrazas de banco implican el movimiento de grandes volúmenes de suelo, hasta generar superficies casi planas.

Los principales criterios para la selección de una técnica de manejo del relieve son los siguientes:

- Potencial de escurrimiento y riesgo de erosión: Este sería un criterio general que indica el grado de complejidad del lote a tratar. Incluye pendiente (gradiente, longitud y especialmente complejidad), agresividad del clima, erodabilidad del suelo, etc. (Capítulo 3). Los suelos más permeables requerirán técnicas más sencillas que aquellos con dificultades para la infiltración. Cuanto mayor sea el potencial de escurrimiento/erosión, mayor complejidad tendrá la técnica de sistematización.
- Tipo de sistema de producción: Los sistemas mixtos permiten la elección de técnicas que implican un uso diversificado del lote, como los cultivos en fajas con pasturas. Contrariamente, los sistemas de producción agrícola puros tenderán a adoptar técnicas que permitan un uso con un solo cultivo.
- Forma de tenencia de la tierra: Una limitación a la adopción de estas técnicas son los sistemas de tenencia bajo arrendamiento de corto plazo, los que se inclinarán, a lo sumo, por las técnicas más sencillas, que no impliquen complicaciones de manejo y que no interfieran con maquinarias de grandes dimensiones, como sembradoras y pulverizadoras.
- Costos: Cuanto mayor es el movimiento de suelo, mayores son los costos de la sistematización. Los métodos que no implican movimiento de suelo tienen un costo relativamente mucho menor.

Los efectos de las técnicas de manejo del relieve sobre las tasas de erosión se discutieron en el Capítulo 3. Además de ellos se han reportado efectos importantes en la productividad de los cultivos, como consecuencia de una mejora en la economía del agua. Troeh *et al*. (1991) reportan incrementos en los rendimientos del orden de 10 % en maíz, 29 % en trigo, 11 % en soja y 28 % en sorgo. Resultados recientes en la zona de Río Cuarto, muestran incrementos en la producción de maíz del orden del 30 % (Colombo *et al*., 2012).

A continuación se detallan las características y principios de diseño y dimensionamiento de cada una de las técnicas de manejo del relieve mencionadas.

5.2. Cultivos cortando la pendiente

Esta práctica consiste en trazar una línea perpendicular a la pendiente principal de un lote, a fin de que sirva como línea base para la siembra de cultivos (línea guía).

Para su marcación en el lote (replanteo) se utiliza un nivel de anteojo con el que se procede de la siguiente manera: el observador se ubica en el medio del lote, a una distancia

más o menos equidistante de los límites del mismo, según la topografía y el criterio del técnico. Previo nivelado del aparato, se ubica un punto o lectura determinado en un jalón o mira estacionado en un límite del lote donde se coloca una marca (estaca o bandera). Posteriormente el mirero (persona que lleva la mira) se traslada hacia el otro límite del lote y se desplaza pendiente arriba o abajo hasta hacer coincidir la visual horizontal del nivel de anteojo con la lectura o marca en la mira o jalón, donde se ubica una nueva estaca o bandera. Uniendo estas dos marcas con la sembradora, el productor obtendrá la línea de base o línea guía de siembra para todo el lote (Figura 5.1).

Estas marcas pueden quedar en forma permanente para ser utilizadas en años venideros. Cabe aclarar que el técnico debe ser muy criterioso porque suelen presentarse casos complejos en los que se puede dividir el lote en dos o más líneas de siembra. Se aconseja utilizar la misma dirección marcada, para la siembra, en tareas de arada, disqueadas, rastreadas y siembra, pudiendo hacerse estas con pequeños cambios de dirección para evitar provocar irregularidades en el terreno.

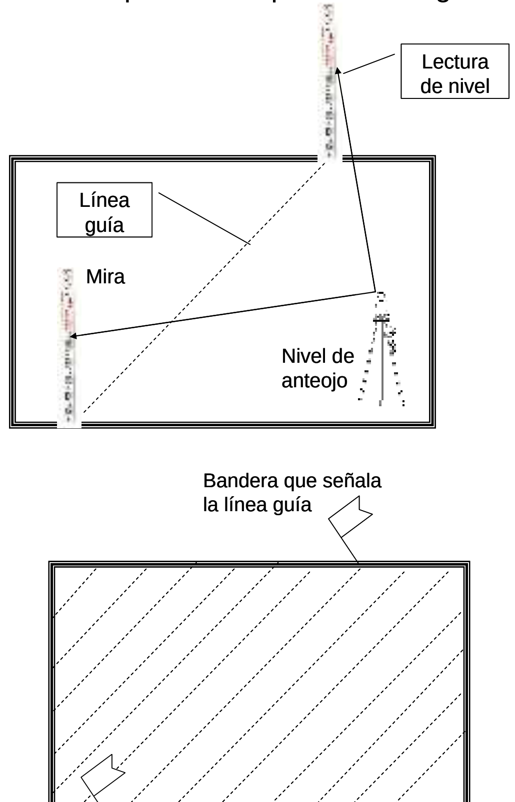


Figura 5.1: Esquema de trazado de línea de base para cultivos cortando la pendiente. Abajo, lote con líneas de cultivo (Figuras vistas en planta, fuera de escala). Nótese que la lectura de nivel en ambos puntos es idéntica.

5.2.1. Condiciones donde se aplica

Esta técnica es la más sencilla de implementar, se aplica en condiciones de bajo potencial erosivo del sitio: pendientes uniformes, de bajo gradiente. Puede aplicarse a cualquier sistema de producción ya que sólo implica la orientación de las líneas de siembra, tanto de cultivos como de pastos. Su efectividad para el control de la erosión dependerá de la rugosidad superficial generada por las labores o por el rastrojo, y del manejo de las condiciones de infiltración del suelo. La línea guía trazada puede usarse además para la implementación de cultivos en fajas cortando la pendiente (Figura 5.2).


Cultivo de cobertura agrícola completa


Cultivo en fajas cortando la pendiente

Figura 5.2: Cultivos cortando la pendiente (UNRC-SECYOT).

5.3. Cultivos en curvas de nivel

Se llama curva de nivel o en contorno a una línea trazada en el terreno, que une puntos de igual altura sobre el nivel del mar. La técnica de cultivos en curvas de nivel, por lo tanto, es aquella en la cual las operaciones de labranza y siembra se realizan siguiendo esa línea.

El efecto de la práctica sobre la escorrentía es similar a la práctica anterior: cortar la pendiente de forma que cada surco o cada planta represente un obstáculo al avance del agua, aumentando la retención y el detenimiento superficial. La ejecución de esta práctica se hace posible a través del trazado de curvas guías a seguir en todas las prácticas de manejo posteriores (laboreos, siembras, formas de pastoreos, etc.) (Figura 5.3).

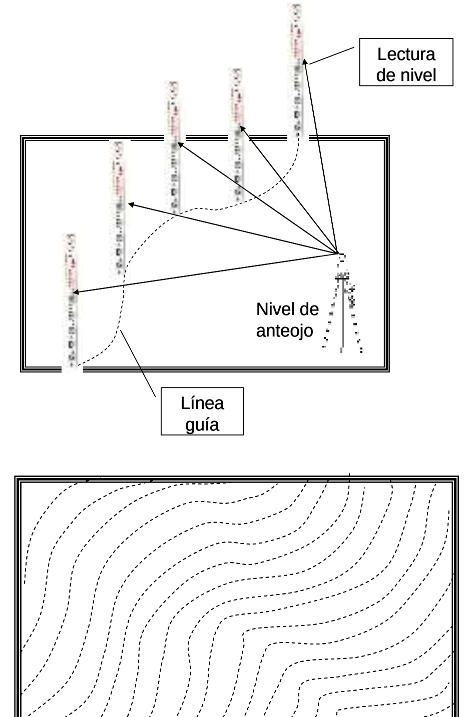
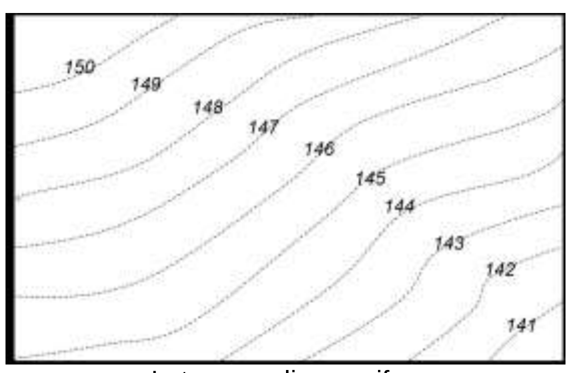


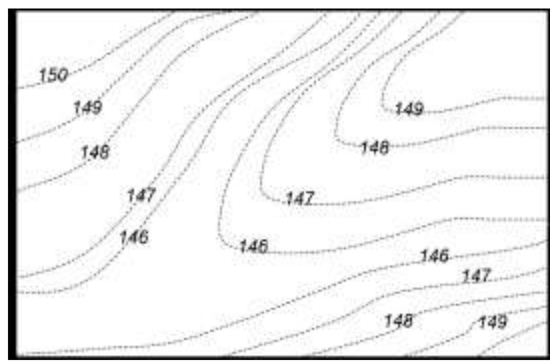
Figura 5.3: Esquema de trazado de la línea guía de cultivo en contorno o curvas de nivel. Abajo, lote con líneas de cultivo (Figuras vistas en planta, fuera de escala). Nótese que la lectura de nivel en todos los puntos es idéntica.

La primera etapa en la implementación de esta práctica consiste en el análisis de la complejidad del terreno a tratar, ya que cuanto más complejo sea, mayor número de líneas guía deberán trazarse. Esto significa que, cuanto más uniforme es un terreno, mayor paralelismo habrá entre líneas guía, y por lo tanto el sistema de cultivo en curvas de nivel será más simple de implementar (Figura 5.4.a).

En la medida que el terreno se hace más complejo o desuniforme, el paralelismo entre curvas de nivel es menor, por lo tanto para realizar esta sistematización puede ser necesario un relevamiento planialtimétrico (o planialtimetría) y de ese modo definir una o varias líneas guía para realizar las siembras (Figura 5.4.b). En la Figura 5.4 se muestran dos ejemplos de topografía con diferente complejidad en las que puede apreciarse el paralelismo entre curvas de nivel.



a. Lote con relieve uniforme



b. Lote con relieve complejo

Figura 5.4: Relevamientos planialtimétricos de dos lotes con diferente complejidad. En líneas de punto, las curvas de nivel (UNRC-SECYOT).

Una vez trazadas las líneas guía en el campo, pueden quedar en forma temporaria, sirviendo de guía las líneas de siembra, o en forma permanente mediante la siembra de una franja de pasturas; de este modo en las sucesivas siembras no será necesario volver a replantear las curvas de nivel guía. En la Figura 5.5 se muestra la implementación de cultivos en curvas de nivel, para dos situaciones representativas.

5.3.1. Condiciones donde se aplica

Se aplica en condiciones de relieve más complejo y pronunciado que la técnica de cultivos cortando la pendiente. Los riesgos de erosión son mayores y no pueden ser adecuadamente resueltos con una simple línea, siendo necesario cortar todas las direcciones de la pendiente. Las curvas guía para este tipo de cultivo pueden servir de base para la realización de cultivos en fajas a nivel, discutidos a continuación.

En relieves complejos se suelen trazas más de una línea guía, las cuales sirven de base para realizar las siembras hacia abajo y arriba, hasta una distancia en la cual las marcas de siembra se encuentran con la otra línea guía. En este caso quedarán zonas desparejas o “chanchos”, los que deben ser sembrados en forma separada. En el apartado siguiente se amplían estos conceptos.




Figura 5.5: Cultivos en curvas de nivel o en contorno (UNRC-SECYOT).

5.4. Cultivos en fajas o franjas a nivel

El cultivo en fajas (también llamadas fajas buffer) consiste en la siembra de fajas o paños alternados de pasturas de crecimiento denso (denominada franja de protección o contención) y cultivos anuales en hileras (faja protegida), perpendicularmente a la dirección de la pendiente o siguiendo curvas de nivel (cultivos en fajas a nivel o en contorno).

Una variante de esta técnica consiste en la siembra en fajas de cultivos anuales, de distinto porte y ciclo de crecimiento, en lo que constituye una forma de cultivos intercalados en franjas (Figura 5.6.b).

Los principios de funcionamiento de los cultivos en fajas son los siguientes:

- Disminución de la velocidad y desorganización del agua de escurrimiento al fluir por la faja de césped denso (aumento del detenimiento y la retención superficial);

- Aumento de la velocidad de infiltración del agua, tanto en la faja de pastura densa como en la cultivada (esto es dependiente del manejo en cada una de ellas);

- Captura del sedimento procedente de la faja de cultivo, el cual se deposita en la faja empastada al disminuir la velocidad del agua de escurrimiento. Este fenómeno se ve promovido por el mayor desarrollo de la faja de pasto en contacto con la franja cultivada (efecto de bordura, Figura 5.6.d);

- Protección mutua de los cultivos intercalados. El cultivo más temprano y denso (p.e. maíz o sorgo) protege al cultivo más tardío y ralo (p.e. maní o soja), tanto de la erosión hídrica como eólica. Al año siguiente, el cultivo ralo se siembra en el sector cubierto con rastrojos abundantes (dejados por maíz o sorgo), y el cultivo denso se siembra más temprano en el sector con menor proporción de residuos (sector que viene de maní o soja).



a. Cultivo en franjas a nivel (USDA-SCS)



b. Cultivos anuales intercalados en franjas a nivel (G. Cabrera, Córdoba)



c. Cultivo en franjas a nivel de distinto ancho (La Barranquita, Córdoba)



d. Detalle de efecto de bordura (La Barranquita, Córdoba).

Figura 5.6: Cultivos en franjas a nivel (UNRC-SECYOT).

5.4.1. Manejo de los cultivos en franjas

Las operaciones agrícolas en lotes cultivados en fajas, se ejecutan en forma similar a las tierras trabajadas en curvas de nivel, sin embargo se debe tener en cuenta algunas particularidades:

a) La siembra en fajas requiere el establecimiento de la rotación. Como el sistema se basa en la alternancia dentro del mismo lote y en la misma estación, de cultivos densos y los que no lo son, es indispensable que en años consecutivos, las fajas se roten de manera que se conserve un buen nivel de protección en todo el lote.
b) Al arar se debe evitar la formación de camellones y surcos muertos.
c) Siempre deben dejarse vías de desagües perfectamente protegidas con vegetación. Estas, facilitan también el tránsito de maquinaria para ejecutar labores en las fajas que lo exigen, sin dañar las plantas en aquellas ocupadas por otros cultivos.
d) En caso de las franjas de cultivos anuales, la rotación es anual. En caso de pasturas deberán respetarse los criterios de vida útil y productividad de las mismas, y la recuperación de productividad del sector agrícola del lote.

El espaciamiento entre fajas es el principal parámetro de diseño de la técnica. Puede ser estimado en forma empírica o a través de la ecuación USLE (Capítulo 3).

El factor LS de la USLE permite obtener una aproximación del espaciamiento entre franjas protectoras, quedando definido el ancho de la franja de cultivo, estableciendo la condición de longitud de pendiente crítica con la cual la tasa de

erosión anual del suelo se mantiene dentro de las pérdidas de suelo tolerables. De este modo, aplicando la fórmula de la USLE y despejando LS, resulta:

$$L \times S = \frac{A}{R \times K \times C \times P}$$

donde A = es la tasa de pérdida de suelo tolerable, definida por el usuario.

Una vez que el valor de LS ha sido obtenido, se utiliza el nomograma de la Figura 3.10 (Capítulo 3), para determinar la longitud de la pendiente crítica en función del gradiente de pendiente local (se ingresa al nomograma por LS, se corta en pendiente del lote y se obtiene la longitud). Esta longitud crítica puede ser tomada como el máximo espaciamiento entre franjas de pradera a través de la pendiente, con el cual la tasa de pérdida de suelo anual se mantendrá por debajo del nivel de tolerancia elegido.

Una aproximación teórica para determinar la longitud de pendiente crítica o espaciamiento entre franjas de pradera, está basada en la velocidad del flujo superficial, en el coeficiente de rugosidad de Manning (Capítulo 6), en las características de la lluvia y de la infiltración de agua en el perfil, y en el gradiente de la pendiente. Se expresa en la siguiente ecuación:

$$Lc = \frac{v^{\frac{5}{2}} \times n^{\frac{3}{2}}}{(R - i) \times sin^{\frac{3}{4}} \times S \times cos\, S}$$

donde:

L_c = longitud de pendiente crítica, a partir de la cual la velocidad del flujo comienza a ser erosiva en m;
v = velocidad máxima permisible del flujo sobre la superficie en m/h;
n = coeficiente de rugosidad de Manning;
R = intensidad de lluvia normal en la zona en mm/h;
i = velocidad final de infiltración de agua del suelo mm/h;
S = pendiente del lote en grados.

El SCS-USDA propone anchos posibles para la faja empastada y de cultivo para diferentes rangos de pendiente (Tabla 5.1).

Tabla 5.1: Ancho de franjas empastada y cultivada en función del gradiente de pendiente y relaciones de ocupación cultivo/pasto.

Pendiente (%)	Ancho de franja empastada (m)	Ancho de franja cultivable (m)	Relación de anchos Cultivo/Pradera -	% de suelo con Pradera
Hasta 1	**8**	**48**	**6**	**14**
Hasta 3	**12**	**36**	**3**	**25**
Hasta 6	**12**	**24**	**2**	**33**
Más de 6	**20**	**20**	**1**	**50**

Es importante tener en cuenta que el ancho de la faja cultivable sea múltiplo del ancho de las herramientas a utilizar, con el fin de facilitar las operaciones de labranza.

Una vez estimados los anchos de fajas protectora y protegida, el método más sencillo de trazado consiste en marcar “líneas guías” (G1 y G2 de Figura 5.6) sobre

curvas de nivel, al igual que el procedimiento mencionado para cultivos en contorno, con un distanciamiento igual al ancho que se le quiere dar a las fajas. Cada línea guía constituye el centro de la franja laboreada, es decir que, estimado un ancho de franja laboreada, se trabaja la mitad de ese ancho hacia arriba y hacia abajo de la línea. El procedimiento para el trazado de las otras franjas es el siguiente:

1- A partir de la línea guía original se pueden paralelizar una o dos líneas hacia arriba y hacia abajo de ella, dependiendo de la complejidad de la pendiente del terreno: en caso de ser compleja es probable que se pueda trazar solo una paralela a cada lado y si es uniforme podrán hacerse dos o más. La distancia o intervalo horizontal (IH) entre línea guía y su paralela será igual a:

IH = Ancho franja cultivada + ancho franja empastada.

Esto se debe a que esa distancia incluye la mitad de la franja cultivada, toda la franja empastada y la mitad de la próxima franja cultivada (Figura 5.7).

2- Luego de la paralelización se procede al trazado de una nueva línea guía (G2 en Figura 5.6.) y se repite el paso anterior.

Resulta conveniente decidir los criterios de distanciamiento entre líneas guías teniendo en cuenta la parte del lote que tenga mayor pendiente, ya que de esta forma se asegura que en esos lugares las fajas tendrán el ancho deseado. Esto, puede ocasionar que queden franjas empastadas demasiado anchas en los lugares con menor pendiente, casos, en los que puede intercalarse en ellas una franja cultivada extra.

La ventaja de este sistema de trazado es que las labores se realizarán en una franja de ancho uniforme, evitando las cuñas o “chanchos”, que quedan automáticamente en la franja empastada.

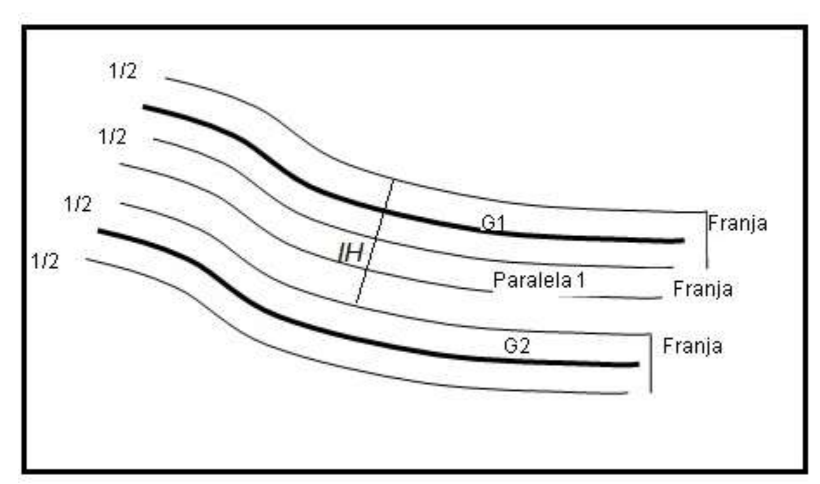


Figura 5.7: Esquema de trazado de los cultivos en fajas a nivel.

La relación entre área cultivada y el cultivo denso va a estar en función del grado de susceptibilidad a la erosión o del nivel de erosión hídrica actual y por supuesto del sistema de producción de la situación analizada. Se podrá comenzar con una relación 1:1 o menor, para luego y a medida que se estabiliza la práctica de conservación y disminuye el caudal de escurrimiento, agrandarla a favor del área cultivada.

5.4.2. Condiciones donde se aplica

La técnica del cultivo en franjas, especialmente la que incluye pasturas permanentes, es una de las más seguras y efectivas para el control de erosión y escurrimientos, ya que combina propiedades ingenieriles de la vegetación, con prácticas estructurales. Por esta razón es aplicable a situaciones con alto potencial de escurrimiento y erosión, en pendientes de algo gradiente, en las cuales la longitud es controlada por la presencia de la pastura densa.

En razón de la inclusión de pasturas es una técnica aplicable a sistemas mixtos de producción, en los cuales se puede hacer un aprovechamiento integrado de pastos y cultivos. Por esta misma razón es una práctica poco aceptada por productores agrícola puros, debido a que la superficie empastada es considerada un área subutilizada del campo. No obstante para estos sistemas de producción se puede implementar la práctica de intercultivos, en una relación que generalmente es 50/50, a los fines de simplificar la rotación.

5.5. Terrazas de banco

El sistema de terrazas de banco o bancales consiste en una serie de áreas planas, semejantes a bancos o escaleras, que convierten una pendiente escarpada en planos casi horizontales (terraplén), separados por paredones (talud), generalmente estabilizados con piedra (Figuras 5.7 y 5.8).

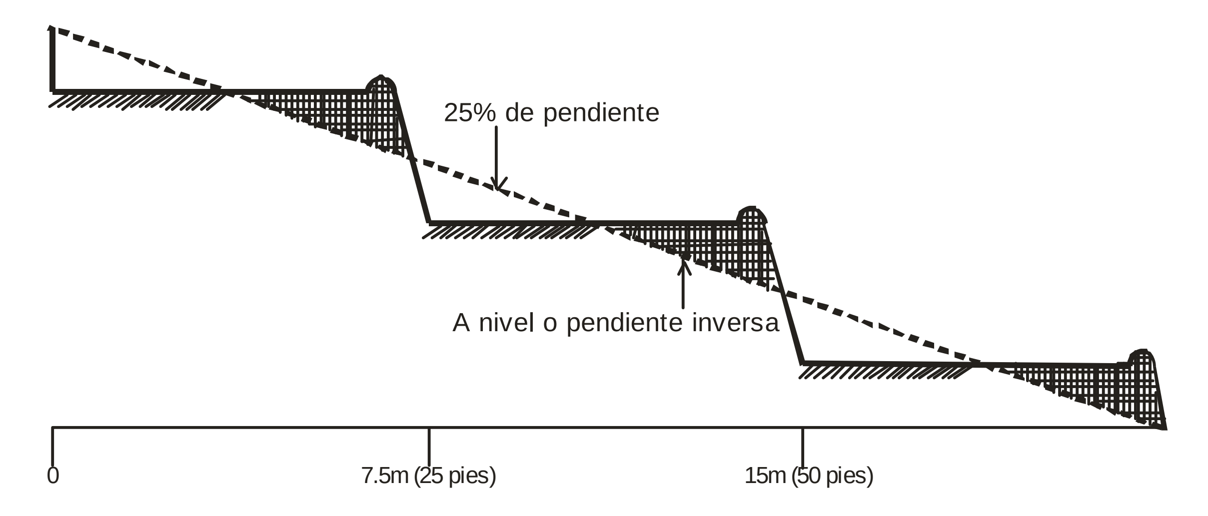


Figura 5.8: Terrazas de banco o bancales.

En las terrazas de banco se modifica tanto la longitud, como el gradiente de las pendientes, ya que se genera una superficie plana. Su uso está concentrado en áreas de montaña, con pendientes superiores al 20 %, y con condiciones del subsuelo que permitan generar terrenos aptos para la agricultura, como los que se observan en la Figura 5.7. Requieren grandes movimientos de suelo para su construcción y una muy alta precisión en el trazado de los bancales y sus vías de desagüe o drenaje, especialmente aquellas construidas en regiones de altas precipitaciones.



Bancales de Banyalbufar (España)

Bancales en Macchu Picchu (Perú)

Arroz en bancales (Longsheng, China)

Arroz en bancales (Bali).

Figura 5.8:Terrazas de banco.

Las terrazas de banco se utilizan también para la repoblación forestal en zonas de montaña, en las que se implementan programas de ordenamiento de cuencas. En este caso las terrazas son de menor ancho, el necesario para la plantación de los árboles sobre las laderas (TRAGSA, 1994).

5.6. Terrazas de banco de conservación

Una variante de las terrazas de bancales típicas, son las llamadas terrazas de banco de conservación. Están diseñadas para regiones semiáridas, donde se requiere una conservación máxima de la humedad. Este tipo de terraza está formado por un terraplén y un canal plano y muy ancho que se asemeja a un banco horizontal, (Figura 5.9). El área inclinada que se extiende pendiente arriba hacia el lomo de la siguiente terraza, es el área de contribución de escurrimiento para los canales. La diferencia entre esta terraza y la convencional a nivel, en cuanto a corte transversal y patrón de almacenaje de humedad se refiere, se muestra en la Figura 5.10.

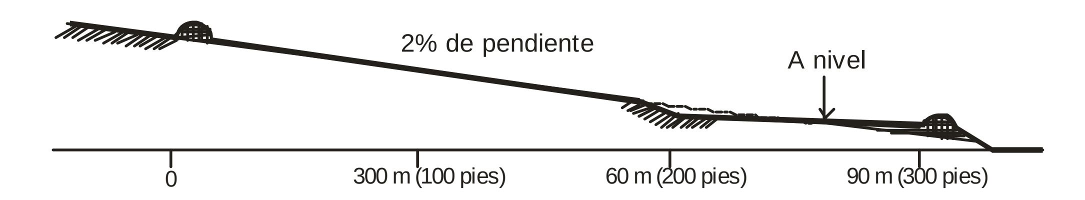


Figura 5.9: Terrazas en banco de conservación.

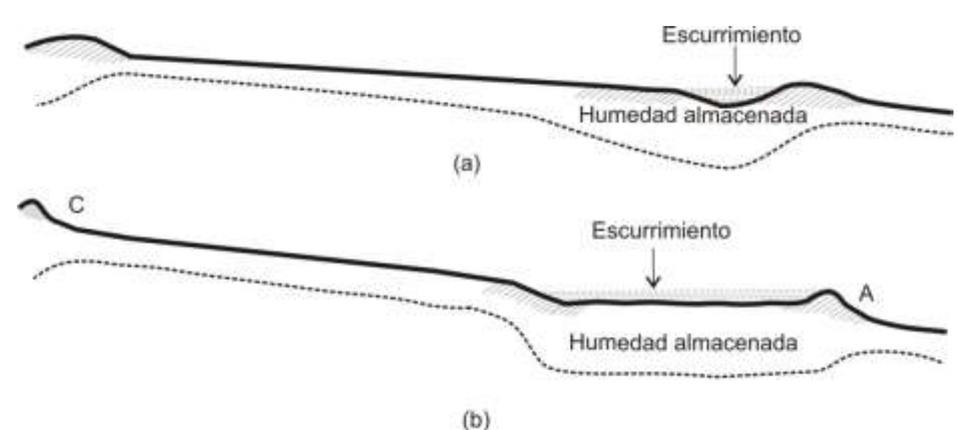


Figura 5.10: Comparación de las secciones transversales de: a) Terraza convencional a nivel, y de b) Terraza de banco de conservación.

5.7.Terrazas de desagüe y terrazas de absorción.

5.7.1. Características generales.

Antes de entrar en el análisis de cada tipo de terraza, se hará una descripción general de las características comunes de ambos sistemas de manejo del relieve.

El objetivo común a ambos tipos de terrazas es cortar la longitud de la pendiente del lote con estructuras conformadas por un bordo de tierra de baja altura. El bordo interrumpe el flujo de la escorrentía, el que puede tomar dos caminos posibles, en función del tipo de terraza:

a) En las terrazas de desagüe el escurrimiento **circula** lentamente por la porción cóncava de la terraza (canal de la terraza) y descarga en un canal de desagüe planificado a tal fin (Figura 5.11, Scotta *et al*., 1989).
b) En las terrazas de absorción el escurrimiento **se acumula** en la porción cóncava de la terraza, provocando allí su infiltración en el suelo (Figura 5.12).

Ambos tipos de estructura afectan principalmente los procesos de detención y retención superficial por efecto de la dirección de líneas de cultivo entre terrazas.

Ambos tipos de terrazas se construyen empujando tierra declive abajo, para formar un cauce con un bordo o camellón bajo, de no más de 30 cm de altura. La dirección de la terraza, en relación a la topografía del lote, dependerá del tipo de terraza elegida:

- Terrazas de desagüe (graded terrace system): Deben ser trazadas sobre una línea con mínima pendiente para que se produzca la descarga hacia un canal colector. La pendiente debe permitir una velocidad lo suficientemente baja como para que no se produzca erosión del canal, y lo suficientemente alta como para que no produzca sedimentación de partículas sobre el canal. Esto se logra con pendientes que no superen el 0,5 % de gradiente.

- Terrazas de absorción (level terrace system): Deben trazarse sobre una línea a nivel para que pueda acumular el escurrimiento generado en el paño de terreno entre dos terrazas consecutivas.



Figura 5.11.a: Esquema de terrazas de desagüe con canal de evacuación central (Tomado del Engineering Field Manual, SCS,. 1984)



Figura 5.12.a: Esquema de terrazas de absorción (Tomado del Engineering Field Manual, SCS. 1984)

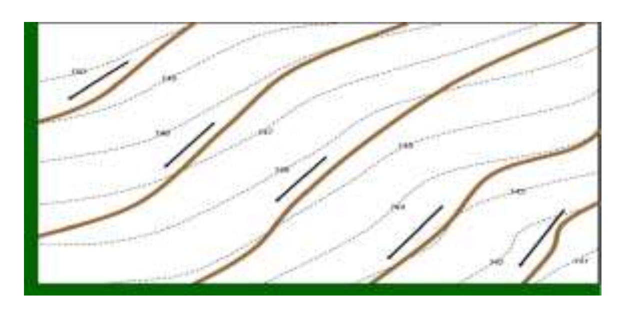


Figura 5.11.b: Canal de terrazas de desagüe funcionando (A. Montesano, INTA)

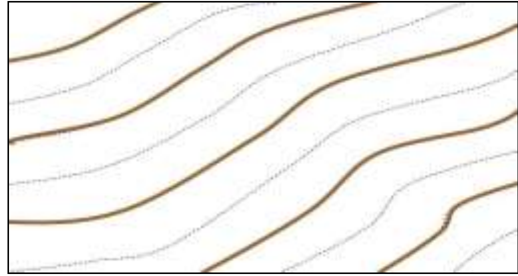


Figura 5.12.b: Terrazas de absorción funcionando (A. Montesano, INTA)

En la Figura 5.13 se indica esquemáticamente la ubicación de los dos tipos de terrazas, sobre un mismo lote. En ella se indican las curvas de nivel obtenidas mediante un relevamiento planialtimétrico y la dirección que toman las terrazas, según sean de desagüe o de absorción. En la Figura 5.12. a se indica además una posible ubicación de los canales de desagüe que receptan el escurrimiento de las terrazas.



a. Terrazas de desagüe. En verde, canal de desagüe, las flechas indican la dirección del escurrimiento



b. Terrazas de absorción, nótese que la línea de la terraza coincide con la curva de nivel.

Figura 5.13: Esquemas de emplazamiento de terrazas en base a un relevamiento planialtimétrico (UNRC-SECYOT). La línea gruesa representa una terraza, la línea punteada representa una curva de nivel. Escala aproximada 1:10.000.

Para ambos tipos de terraza, el diseño transversal, es decir la configuración del conjunto canal-bordo, puede ser de dos tipos:

- De base ancha: También llamadas terrazas cultivables, ya que el diseño de la terraza es lo suficientemente ancha como para que puedan ser cultivadas en su totalidad. Para que esto sea posible las terrazas deben tener un ancho de entre 10 y 15 m, distribuido en partes aproximadamente iguales entre canal y bordo, con una relación de taludes de aproximadamente 5 a 8:1 (quiere decir que si la terraza tiene 30 cm de altura, el talud del bordo tendrá entre 1,5 y 2,4 m, con lo cual sólo el bordo ocupa entre 3 y 5 m, Figura 5.14). En esta forma aprovecha también la circunstancia de que un canal con tales especificaciones es un conductor de escorrentías a bajas velocidades.

La sección transversal de una terraza de base ancha (son aquellas que permiten ser sembradas en su totalidad sin provocar inconveniente a la maquinaria agrícola), para los propósitos de diseño, puede considerarse como un canal triangular, según se muestra en la Figura 5.13.

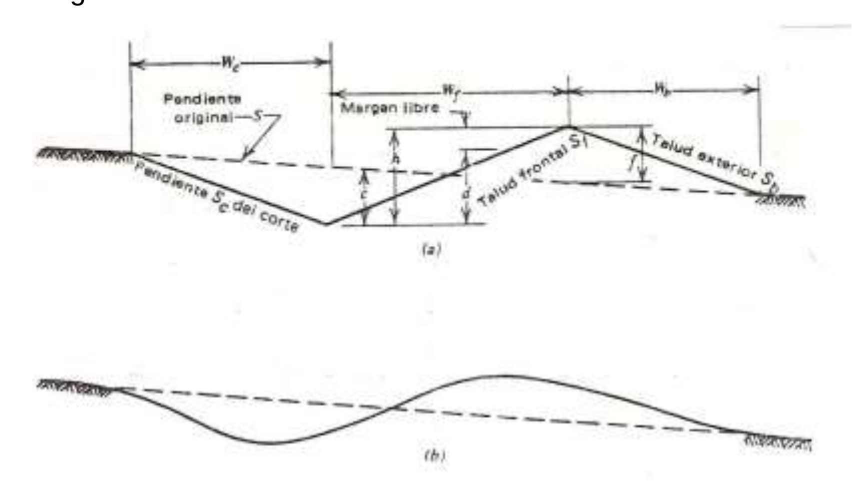


Figura 5.14: a) Diseño de la sección transversal de una terraza de base ancha. b) Sección transversal de una terraza de base ancha después de 10 años de cultivo.

La profundidad de la corriente (d en Figura 5.14) es la altura a la parte superior del camellón menos un margen o bordo libre aproximadamente de 8 cm. Después de suavizarlos, los anchos del fondo y del camellón deberán tener casi 1 m, lo cual dará un corte transversal que se aproxima a la forma de una terraza después de 10 años de cultivo. Al diseñar las secciones transversales, el ancho de la pendiente del frente (w_f) debe ser igual al ancho de la maquinaria que se utiliza para las operaciones de labranza y cultivo.

Cuando los anchos de los taludes laterales son iguales (w_c=W_f=W_b=W), los cortes y los rellenos según la geometría son:

$$\mathbf{c + f = h + s\,W}$$

donde:

c =corte
f =relleno
h =profundidad del canal incluyendo el margen libre
s =pendiente original del terreno
W =ancho del talud lateral

- De base angosta: También llamadas terrazas empastadas, debido a que, al ser de sección más angosta, no pueden ser cultivadas y terminan empastándose en la porción del camellón. Su ancho normalmente está entre 5 a 8 m, para una misma altura de terraza. Este tipo de terraza es más segura, ya que hay menores riesgos de

rotura del bordo al estar empastado. Se utiliza en condiciones de mayor potencial de escurrimiento que la terraza de base ancha (mayor pendiente, suelos menos permeables, uso más intensivo del lote, mayor intensidad de lluvia, etc.).

En la Figura 5.15 se muestran ambos tipos de terraza.



Terraza cultivable de base ancha (Las Perdices, Córdoba, UNRC-SECYOT).



Terraza de base angosta no cultivable (Rodeo Viejo, Córdoba, UNRC-SECYOT).



Construcción de terraza de base ancha (J. Gvozdenovich, INTA Entre Ríos)



Construcción de terraza de base angosta (J. Gvozdenovich, INTA Entre Ríos)

Figura 5.15: Diseño transversal de terrazas.

En la Tabla 5.2 se indican las principales características de ambos tipos de terrazas.

Tabla 5.2: Algunas características de los sistemas de terrazas.

Característica	Terrazas de desagüe	Terrazas de absorción
Pendiente	Hasta 0,5 %	Cero
Escurrimiento/ captación lluvia	Descarga a un canal. Parte de la lluvia se pierde.	Se acumula en la terraza. No hay pérdidas.
Terreno	Alto potencial de escurrimiento	Bajo potencial de escurrimiento
Diseño	Base ancha o angosta	Normalmente de base angosta
Paralelización	Posible, variando la pendiente.	Debe respetar la línea a nivel.
Planialtimetría	Necesaria. Sólo en pendientes uniformes puede replantearse directamente a campo.	Necesaria. Pueden replantearse directamente a campo.
Riesgo de desborde	Bajo, el agua circula	Alto, el agua se acumula.
Mantenimiento	Permanente	Permanente
Obras complementarias	Canales de desagüe, drenajes subterráneos	Canales de desagüe opcionales.
Sedimentos	Parte se descargan a las vías de drenaje	Quedan retenidos en la terraza

5.7.2. Diseño y dimensionamiento de terrazas

El diseño de un sistema de terrazas de desagüe implica la definición del espaciamiento y la localización apropiada de las terrazas, el diseño de un canal de capacidad suficiente y el desarrollo de secciones transversales fáciles de cultivar. Las características del suelo, las prácticas de manejo del suelo y del cultivo, y las condiciones climáticas son los puntos más importantes en el diseño de esta técnica.

Una de las principales definiciones de diseño de un sistema de terrazas de desagüe es la posibilidad de paralelización y rectificación del trazado en el lote. Se denomina paralelización al diseño siguiendo líneas paralelas (curvas o rectas), según el análisis de la planialtimetría. Por otra parte un sistema rectificado es aquel en el que las terrazas, además de paralelas, siguen líneas rectas, en forma similar a la definida para los cultivos cortando la pendiente. De acuerdo a esta clasificación las terrazas de desagüe pueden ser:

a) Curvas no paralelas: responden a un diseño complejo del relieve, en dirección y gradiente.
b) Curvas paralelas: el relieve es complejo en dirección, pero uniforme en gradiente,
c) Rectas no paralelas: el relieve es de dirección uniforme pero gradiente complejo.
d) Rectas paralelas: el relieve es uniforme en dirección y gradiente.

Cuanto más rectas y paralelas sean las terrazas, menores dificultades de manejo acarrean, en relación a líneas de siembra, pulverización y cosecha. En la Figura 5.16 pueden observarse estos diferentes diseños.

Espaciamiento entre terrazas

Terrazas de desagüe

La distancia horizontal o intervalo horizontal (IH) entre terrazas es el otro parámetro de diseño esencial del sistema. El IH se estima bajo el principio que la escorrentía que fluye sobre el terreno entre dos terrazas no alcance velocidad erosiva. Depende por lo tanto de la pendiente del terreno, de las condiciones del suelo y del cultivo que en él se establezca y de las características climáticas del lugar (tipo e intensidad de precipitación).

Se denomina intervalo vertical (IV) a la diferencia de altura entre dos terrazas consecutivas. La pendiente del terreno S se relaciona con IH e IV según:

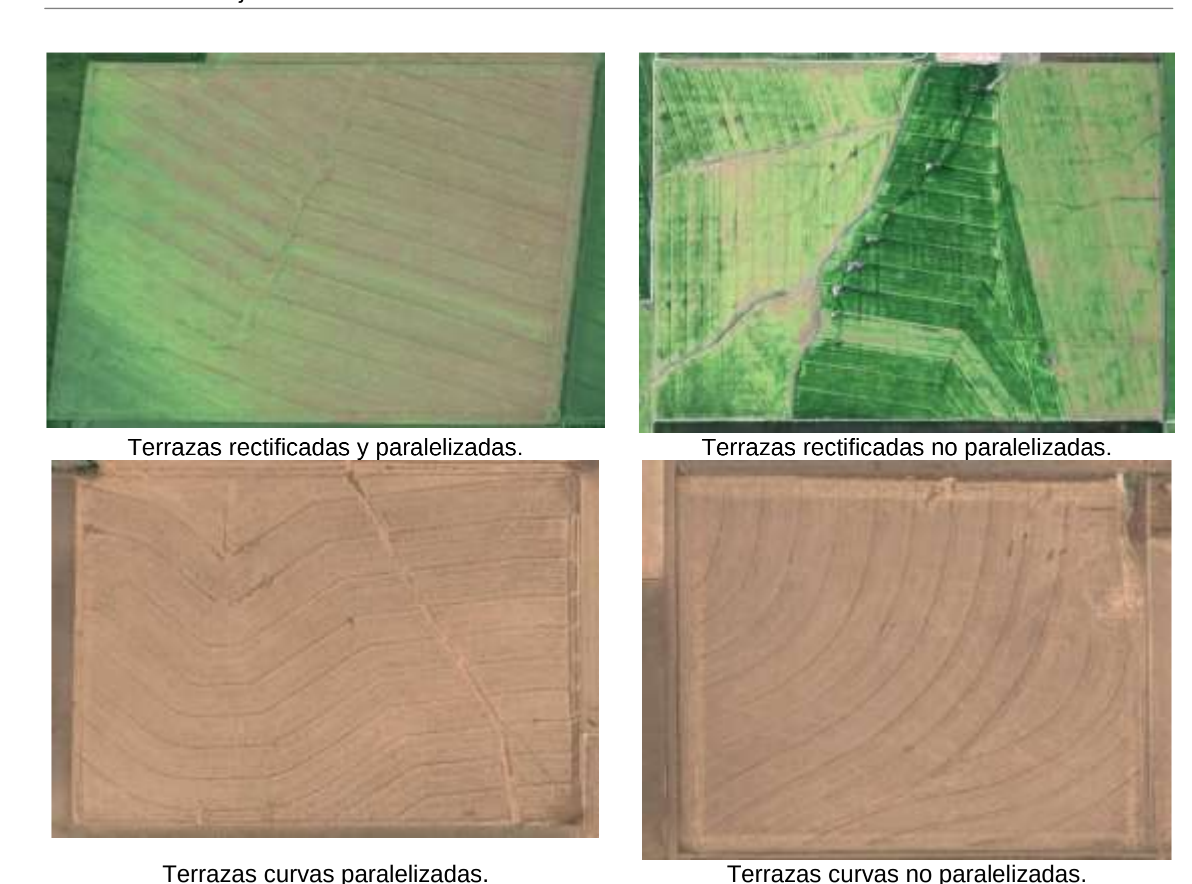
$$IH = \frac{IV \times 100}{S}$$

donde:

IH= **intervalo horizontal**: Distancia horizontal de separación entre dos terrazas consecutivas, en m.

IV= **intervalo vertical:** Diferencia en altitud entre dos terrazas adyacentes, en m.

S= pendiente del terreno, en %.



Terrazas rectificadas y paralelizadas. Terrazas rectificadas no paralelizadas.

Terrazas curvas paralelizadas. Terrazas curvas no paralelizadas.

Figura 5.16: Diferentes diseños en planta de terrazas de desagüe (UNRC-SECYOT).

Existen diferentes fórmulas empíricas utilizadas para el cálculo del intervalo vertical (IV). A continuación se indican las siguientes:

- Servicio de Conservación de suelos del USDA (Engineering Field Manual, SCS 1984):

$$IV = (a \times S + b) \times 0.3$$

Donde
IV = intervalo vertical, en m.
a = 0,4 –0,8 para áreas de altas y bajas precipitaciones respectivamente. Para la región central de Argentina, pueden tomarse valores intermedios.
b= 1 - 4 según características del suelo, cultivo y prácticas de manejo. 1 para condiciones de alto potencial de escorrentía, 4 para condiciones contrarias.
S = gradiente de la pendiente, en porcentaje.

Por ejemplo, para la región de Río Cuarto (Córdoba), en un lote con 2 % de pendiente, puede tomarse un valor a = 0,6 y b = 3, luego el IV = (0,6 * 2 + 3)*0,3 = 1,26 m. El IH correspondiente será IH = (1,26 * 100) / 2 = 63 m. Si la pendiente del lote hubiera sido del 3 %, el IH sería igual a 42 m.

- Fórmula de Rhodesia (Hudson, 1982):

$$IV = \frac{S + f}{2} \times 0.3$$

donde:
IV = intervalo vertical en m
f = 3,0-6,0 según la erodabilidad del suelo.
0,3= factor de conversión de pies a metros

- Fórmula de Sud Africa (Hudson, 1982).

$$IV = \left(\frac{S}{a} + b\right) \times 0.3$$

Términos similares a los del SCS.

A través de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE, Capítulo 3), despejando el factor L, tomado como el intervalo horizontal que define una tasa de erosión tolerable por el proyectista (Ver apartado de cultivo en franjas a nivel).

Un criterio adicional para ajustar el IH entre terrazas es el de considerar que debe ser múltiplo del ancho de las maquinarias a utilizar, para facilitar las operaciones sobre las mismas.

En términos generales, los espaciamientos mayores deben usarse en suelos permeables, ricos en materia orgánica, en terrenos en los cuales va a practicase una rotación con una alta proporción de plantas protectoras y en zonas con lluvias de baja intensidad. Los espaciamientos menores se aplican en suelos muy compactos, de baja permeabilidad, en suelos ocupados por cultivos que ejercen poca protección al suelo (cultivos de escarda) y precipitaciones de alta intensidad. En la Tabla 5.3 se presentan valores de IH e IV que, si bien fueron recomendados para EEUU, puede servir como guía o marco de referencia al estimar los distanciamientos en una situación local. Se tomó a la pendiente como criterio de espaciamiento.

Tabla 5.3: Intervalos vertical y horizontal en función del gradiente de pendiente.

Pendiente del terreno (%)	**Intervalo vertical (IV) (m)**		**Intervalo horizontal (IH) (m)**	
	Mínimo	**Máximo**	**Mínimo**	**Máximo**
1	0,50	0,70	50,0	70,0
2	0,64	0,86	32,0	43,0
3	0,70	0,95	23,0	31,0
4	0,76	1,00	10,0	25,0
5	0,83	1,12	16,6	22,4
6	0,89	1,20	14,8	20,0
7	0,96	1,29	13,7	18,4
8	1,02	1,38	12,8	17,3
9	1,08	1,47	12,0	16,3
10	1,15	1,55	11,5	15,5
11	1,21	1,64	11,0	14,9
12	1,28	1,73	10,6	14,4

Terrazas de absorción

El cálculo del IH de terrazas de absorción sigue un criterio hidrológico que se basa en que el volumen unitario escurrido en el paño entre dos terrazas (es decir por m de ancho unitario), debe ser igual al volumen unitario que es capaz de retener la terraza de absorción. El volumen escurrido (expresado en m) se puede estimar con la

metodología de la Curva Número, o con el coeficiente de escorrentía (Capítulo 2). Se requiere además conocer la pendiente del terreno, y la altura de la terraza. La ecuación que despeja L, o longitud entre dos terrazas, equivalente al IH discutido, se expresa como (Luque, 1997):

$$L = \frac{2 \times H^2}{9 \times Q \times S}$$

Donde:
L = intervalo horizontal entre terrazas,en m,
H = altura de la terraza, en m
Q = lamina de escurrimiento para una tormenta extrema, en m
S = pendiente del lote en tanto por 1.

Por ejemplo, una terraza de absorción de 30 cm de altura, para retener 40 mm de escurrimiento en una pendiente del 2 %, da como resultado una terraza cada 25 m.

$$L = \frac{2 \times 0.09}{9 \times 0.04 \times 0.02} = 25\ m$$

Si la altura de la terraza se incrementa en 10 cm, el IV resultante es de 44 m.

Desnivel de las terrazas

La pendiente o desnivel de las terrazas hacia el desagüe varía desde cero (terrazas de absorción o a nivel) hasta 0,5%. Se procura utilizar siempre el menor desnivel que sea posible, de manera que el agua circule por el canal con velocidades apenas suficiente para prevenir la sedimentación de las partículas que acarrea el agua. En esta forma, además, se evita que el propio lecho del canal llegue a sufrir erosión.

La terraza a nivel o de absorción en su construcción y estabilización, exige mayores cuidados, para evitar que queden puntos bajos en los cuales habría una excesiva acumulación de agua, generando lugares de alta susceptibilidad al desborde y ruptura de la estructura y de las que se encuentran aguas abajo, por concentración del flujo de agua y por modificación del volumen de escurrimiento que recibirá y para el cual no fue diseñada.

En terrazas de desagüe, suele darse un desnivel variable a la línea de trazado, comenzando con el mínimo en la parte superior, y terminando con el máximo desnivel posible en proximidades del desagüe. Este sistema es aconsejable en estructuras de gran longitud y permite aumentar la capacidad del canal sin aumentar la sección del canal, lo cual significa economía en construcción. La Tabla 5.4 da una orientación sobre los desniveles permisibles por cada 100 m de longitud de terrazas de desagüe,

Tabla 5.4: Desnivel de terrazas en función de la longitud de la misma.

Longitud (m)	**Desnivel o pendiente hacia el desagüe (%)**	
	Mínimo por 100 m	**Máximo por 100 m**
0-100	a nivel	0,10
100-200	0,10	0,15
200-300	0,15	0,20
300-400	0,20	0,30
400-500	0,30	0,40

Longitud de las terrazas

La forma y el tamaño del lote a sistematizar, las posibilidades de ubicación y tamaño de canales de desagüe drenaje, la tasa de escurrimiento, son los factores que definen la longitud de la terraza.

Las terrazas demasiado largas presentan serias dificultades de construcción y manejo. Exigen secciones transversales demasiado amplias y mayores coeficientes de seguridad, especialmente en los tramos cercanos al desagüe para poder recibir la escorrentía acumulada del área que protegen sin recurrir a desniveles exagerados.

Se han acumulado longitudes máximas normales y absolutas en base a las características de los suelos sobre los cuales se han de establecer, (Tabla 5.5):

Tabla 5.5: Longitud de terrazas en función de la textura del suelo.

	Tipo de suelo	
	Arenosos	**Arcillosos**
máxima longitud normal (m)	**240**	**400**
máxima longitud absoluta (m)	**400**	**450**

Para las terrazas de absorción o a nivel no hay longitud máxima, particularmente cuando se colocan pequeños diques u obstrucciones en el canal cada unos 150 metros. Estos diques evitan la pérdida total de agua de la terraza y reducen los daños que ocasionan los riachuelos si se llegan a romper.

Emplazamiento de los desagües

En un sistema de terrazas de desagüe, lo primero a construir, son los desagües. En lo posible, es conveniente utilizar como tales, los cauces naturales existentes en el predio, cuando los costos de defensa de esos desagües sean menor o igual a los que representan la defensa de la cabecera de ese cauce natural, más el costo de construcción de un nuevo desagüe y el posible lucro cesante de la superficie destinada a canal.

En función de la topografía del lote y de la cuenca en general, la conformación de los desagües puede ser alguna de las siguientes:

- Desagüe en una o dos cabeceras del lote,
- Desagüe en todas las cabeceras del lote,
- Desagüe en el centro del lote,
- Desagüe en el centro y cabeceras del lote.

En la Figura 5.17 se indican esquemáticamente este tipo de localización de los desagües y la dirección del escurrimiento que descargan las terrazas.

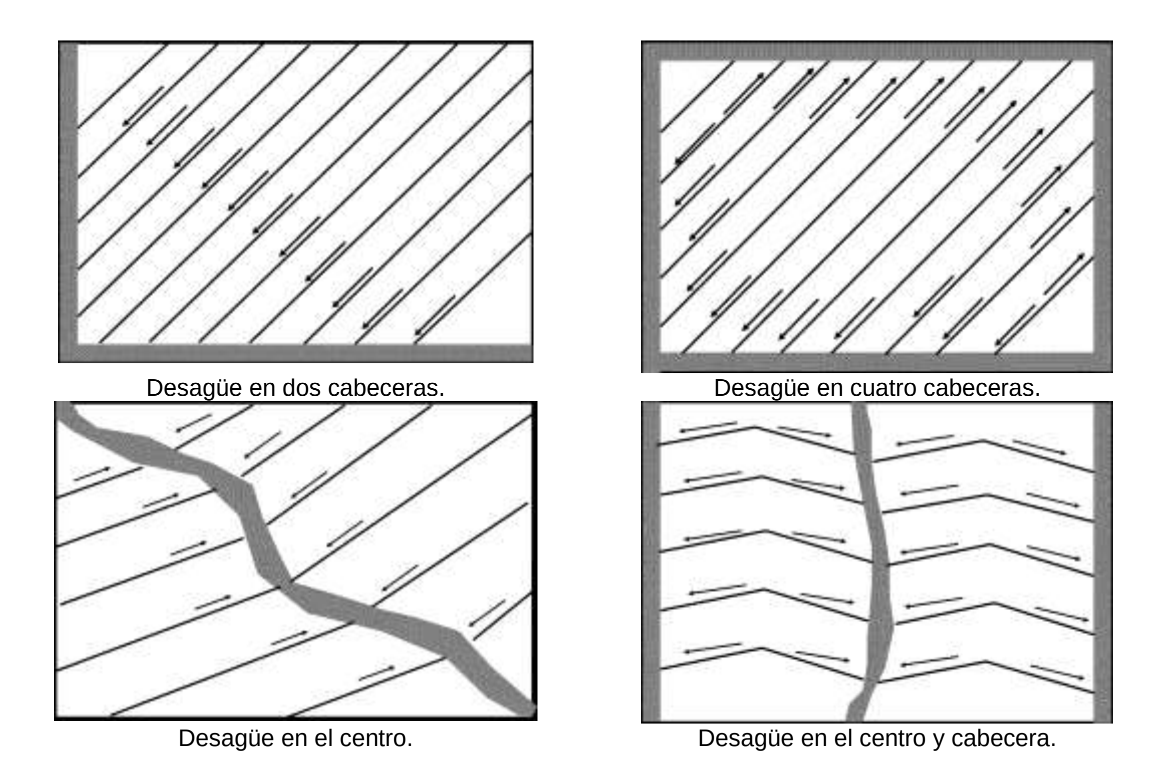


Figura 5.17: Diferentes tipos de localización de desagües de terrazas (UNRC-SECYOT) Esquemático: Líneas llenas indican las terrazas, flechas indican el escurrimiento, zonas grises indican canales de desagüe.

Establecido el lugar de ubicación de los desagües y conocido el gradiente del mismo, el cálculo de su capacidad de conducción o caudal y dimensionamiento se puede realizar a través de lo expuesto en el apartado sobre control de escurrimientos (Capítulo 6).

Trazado de las terrazas

Para el trazado de las terrazas es necesario conocer las diferentes alturas del terreno, identificar las vaguadas naturales que podrán utilizarse como desagües, para lo cual es necesario realizar una planialtimetría del lote a sistematizar (tanto más necesaria cuanto más compleja sea la pendiente) o definir a través de un simple reconocimiento a campo, la dirección de la pendiente principal en casos en que la misma sea uniforme. El objetivo es poder contar con curvas de nivel para terrazas de absorción o curvas con un cierto desnivel para las terrazas de desagüe.

Esta tarea se realiza en tres etapas:

1. Etapa de campo: con la ayuda de instrumental óptico, se realiza un relevamiento planialtimétrico. Existen en la actualidad receptores GPS con corrección diferencial que permitan realizar planialtimetrías expeditivas y muy precisas.
2. Etapa de gabinete para el procesamiento de los datos obtenidos a campo, y para la definición de todos los parámetros del diseño: IV, IH, localización y dimensionamiento de desagües, paralelización, rectificación, tipo de terraza, etc.
3. Replanteo o ejecución en el terreno del proyecto desarrollado en gabinete. Otros detalles sobre las etapas de ejecución de un sistema de terrazas pueden verse en Luque (1997).

5.7.3. Construcción de las terrazas

La construcción de las terrazas puede realizarse con la maquinaria disponible en el campo, como arados de discos o arado rastra o rastrón, o con maquinaria vial, como topadora o motoniveladora. Actualmente se cuenta con maquinaria especializada par realizar esta tarea: las terraceadoras (Figura 5.18). Algunas son modificaciones de rastras de doble acción, mientras que otras trabajan expulsando la tierra hacia el costado.



Construcción con motoniveladora de arrastre (J. Gvozdenovich, INTA Entre Ríos)



Construcción con arado terraceador (J. de Battista, Entre Ríos).



Terraceador (J. Gvozdenovich, INTA Entre Ríos)



Terraceador (UNRC-SECYOT)

Figura 5.18: Herramientas para la construcción de terrazas**.**

Deben tenerse presente algunos detalles para lograr economía y eficiencia en la construcción de un sistema de terrazas. Los principales son los siguientes:

- Comenzar siempre la construcción de las terrazas por la más alta en el terreno, continuando en orden hasta la más baja. En esta forma se evita el peligro de que después de construir algunas terrazas en la parte baja del lote, una precipitación fuerte las destruya o dañe gravemente, por no tener capacidad para recibir la escorrentía de toda el área que aún no se ha protegido.
- Remover en cada vuelta, tanta tierra como la potencia de la máquina lo permita, de este modo se asegura el uso eficiente del equipo.
- En pendientes suaves, tratar de mover toda la tierra de arriba hacia abajo, es más económico.
- Procurar no mover la tierra de sitios que luego habrá necesidad de rellenar.
- Procurar que la máquina trabaje siempre en tierra que no haya sido removida, esto quiere decir que en cada serie de vueltas de la máquina terraceadora (arado, cuchilla niveladora, etc.) debe aumentarse algunos centímetros la profundidad de corte.

- Antes de iniciarse la construcción de una nueva terraza, debe haberse terminado por completo la anterior. Todo el sistema será tan débil como el punto más débil en él.
- Conviene trabajar el suelo en estado húmedo o friable, como el recomendado para cualquier tipo de movimiento de suelo. Esto permitirá un mejor aprovechamiento de la energía y una mejor compactación del suelo una vez pisado.

Es necesario aclarar que los sistemas de terrazas son prácticas auxiliares de control de erosión que tienen como objetivo disminuir la longitud de la pendiente que recorre el escurrimiento y retardar su velocidad de salida, pero que su sola instalación no modifica la proporción total del agua que escurre, la que está definida por las técnicas de manejo del suelo entre terrazas que incrementen la entrada de agua al mismo por aumento de la velocidad de infiltración (Capítulo 4).

Desde el punto de vista económico, requieren una inversión de capital importante en su construcción y un muy ajustado mantenimiento, ya que una falla en cualquier punto de su recorrido puede hacer peligrar al sistema en su conjunto, provocando más daño que si no estuvieran.

En cuanto a la oportunidad de construcción: normalmente se prefiere construir y empastar las vías de desagüe en otoño, luego del período de lluvias, ya que es el mejor momento de implantación de las pasturas (en las terrazas de base angosta), y si los desagües se empastan bien, permite la construcción de las terrazas en la primavera siguiente, antes de la siembra de los cultivos de cosecha gruesa.

5.7.4. Mantenimiento de las terrazas

El mantenimiento de un sistema de terrazas no implica costo adicional alguno, si se tiene la precaución anualmente de arar el lote teniendo en cuenta una serie de pautas:

- En el caso de que el sistema de terrazas se haya construido con arado, luego de cosechar el cultivo sembrado, se deberá realizar un repaso de los lomos para darles la altura correspondiente. Esto se debe a que las terrazas no quedan lo suficientemente compactadas y luego del cultivo, se produce un asentamiento que disminuye la altura total prevista. Este punto no resulta necesario cuando las terrazas han sido construidas con equipos viales, ya que quedan perfectamente compactadas;
- Al cambiar la rotación del lote, conviene hacer un repaso de todo el sistema de terrazas, debido a que el pisoteo de la hacienda produce una compactación que hace disminuir la altura efectiva de las terrazas;
- El cuidado fundamental que requiere cada vía de desagüe es cuando se las cruza o transita con herramientas de distintos tipos. Es importante que al trabajar un lote, se levanten las herramientas y se disminuya la velocidad al cruzar el desagüe, porque se producen daños en la cubierta vegetal y a los pocos años el canal queda reducido a a la mitad o tal vez menos de su ancho original;
- En caso de terrazas de base angosta empastadas, se debe cuidar la pastura implantada, mediante cortes periódicos para mantener la limpieza de la misma y la altura prevista para su funcionamiento.
- Debe controlarse adecuadamente el pastoreo, en especial evitando el sobrepastoreo, y la localización de callejones de tránsito de la hacienda hacia las aguadas, los que suelen ser sitios preferenciales de rotura de terrazas.

Bibliografía

Colombo, G.; González, J. y C. Cholaky Pérez. 2012. Rendimiento de maíz sembrado en curvas de nivel en función del contenido hídrico edáfico. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina. Actas.

de Prada, J.D.; Cristeche, E.R.; Cisneros J.M. y A. Cantero G. 2011. Análisis beneficio costo de la conservación de suelo dentro y fuera del establecimiento agropecuario: Aplicación a la Cuenca La Colacha, provincia de Córdoba, Argentina. III Congreso Internacional de Economía Agraria. Valdivia Chile. Actas.

Hudson, N. 1982. Conservación del Suelo. Ed. Reverté. Barcelona. 335 pp.

Luque, E.L. 1997. Prácticas estructurales. En: Sereno, R. (Coord.) Manual de control de la erosión hídrica. Universidad Nacional de Córdoba.

Scotta, E., Nanni, L.A., Conde, A.A., Rojas, A.C., Castañeira H. Y O. Paparotti. 1989. Manual de sistematización de tierras para el control de erosión hídrica y aguas superficiales excedentes. Serie didáctica 17. EEA Paraná INTA. En: http://anterior.inta.gob.ar/parana/info/documentos/suelos/perdidas/calcPerdidas manual.pdf acceso en Marzo de 2012.

SCS, Engineering Field Manual. 1984. Chapter 8. Terraces.

TRAGSA (Empresa de Transformación Agraria S.A.) 1994. Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de la Erosión. Mundi Prensa, España, 885 pp.

Troeh, F.R., Hobbs, J.A. y R.L. Donahue, R.L.1991. Soil and Water Conservation. Second Edition. Prentice Hall, Inc. 530 pp.

Capítulo 6: Técnicas de control de escurrimientos

6.1. Introducción

En los Capítulos 4 y 5 se discutieron los fundamentos de las técnicas que permiten capturar el agua en el lugar donde cae, a través del manejo de la infiltración, la retención y el detenimiento superficial. No obstante, en la mayor parte de las zonas sujetas a erosión hídrica, no es posible la captación de la totalidad del agua de lluvia, por lo que deberán implementarse un conjunto de técnicas de manejo de los excedentes hídricos.

En este Capítulo se discute un conjunto de técnicas con dos objetivos principales:

- Definir, consolidar y estabilizar la red de drenaje de la cuenca, a través de obras de conducción controlada de los escurrimientos y de control de erosión en las vías de drenaje (el control de erosión en cauces permanentes se discute en el Capítulo 7).

- Reducir los caudales máximos en las cuencas, a los fines de reducir el potencial erosivo del escurrimiento en toda la red de drenaje, a través de la técnica de reguladores de escurrimiento.

Los principios en que se basan las técnicas son la hidrología de eventos extremos (Capítulo 2), hidráulica de canales abiertos (Fangmeier *et al*., 2006), bioingeniería (Capítulo 7) y traslado de hidrogramas mediante ecuación de continuidad (Chow *et al*., 1993). Al final del Capítulo 2 se incluye un anexo con la utilización del programa HEC-HMS para el dimensionamiento de reguladores de escurrimiento.

La implementación de estas técnicas puede requerir la intervención del sector privado o público, según la magnitud y los costos, y la posibilidad de beneficios sociales de llevarlas a cabo. Cuando las características de la obra así lo exijan, debiera haber una intervención de los organismos del estado provincial y nacional, planificando el manejo de los excedentes de agua por ser necesario, no solo la protección de la producción agropecuaria, sino también la estructura física de una región o cuenca (efectos del escurrimiento sobre caminos, puentes, poblaciones, etc.).

En casos no tan extremos o refiriéndose exclusivamente a problemas parciales en cuencas de utilización agropecuaria, las prácticas hidráulicas que se describen en este Capítulo son de utilidad en la protección general de la cuenca y se complementan con el manejo racional de las tierras.

Las técnicas descriptas en este Capítulo son las siguientes:

- Técnicas de conducción controlada de escurrimientos
  - Canales de guarda o interceptores
  - Canales de desagüe empastados
- Técnicas de control de cárcavas
  - Estructura fija
  - Saetín o tobogán

- Aleros
- Albardón con desagüe lateral
- Parabolizado y albardonado
- Praderización y forestación de cárcavas.

- Técnica de control de caudales máximos: Reguladores de escurrimiento.

6.2. Prácticas de conducción de escurrimientos

6.2.1. Canales de guarda e interceptores

El canal es una estructura hidráulica diseñada para conducir agua, bajo distintos fines. Los canales utilizados en conservación de suelos son estructuras de tierra estabilizadas mediante vegetación herbácea (canales empastados), cuya finalidad es conducir agua a velocidad no erosiva. Existen otros tipos de canales como los de riego, en los cuales el principal fin es conducir agua minimizando las pérdidas por percolación. En este Capítulo trataremos el primer tipo de canal.

Los canales de guarda o interceptores son un tipo de estructura hidráulica que interceptan el agua proveniente de zonas altas y la conducen de manera controlada, derivándola a zonas donde se elimina en forma no erosiva. Tienen como función el aislamiento hidrológico y la protección de tierras y construcciones (Figura 6.1).



Figura 6.1: Canales interceptores o de guarda (En línea amarilla, la sección parabólica del canal. (SECYOT-UNRC).

La práctica tiene ubicación en una amplia gama de condiciones: en sectores pedemontanos, con asociación de áreas serranas y valles que reciben el escurrimiento difuso; para el aislamiento de cárcavas, caminos y construcciones diversas o para la delimitación de unidades hidrológicas independientes (p.e. un lote).

Para la ubicación de la práctica deben tenerse en cuenta las condiciones del relieve y las características de la red de drenaje. La topografía deberá permitir trazar el canal de guarda con una pendiente adecuada hacia la red de colectores previamente planificada.

Diseño y dimensionamiento

Se analizarán los principios básicos para definir la forma, tamaño y trazado de los canales de guarda. Los principios de diseño de forma y tamaño son comunes para todos los tipos de canales empastados, tanto de guarda como de desagüe.

Forma del canal

Los canales pueden ser trapeciales, triangulares o parabólicos. Para canales de tierra, la tendencia natural es hacia la forma parabólica (Figura 6.2) por efecto de la vegetación, la erosión o la sedimentación en el canal. Además es la forma que más se adapta para la construcción con maquinaria convencional (arado de discos, múltiple, etc.).

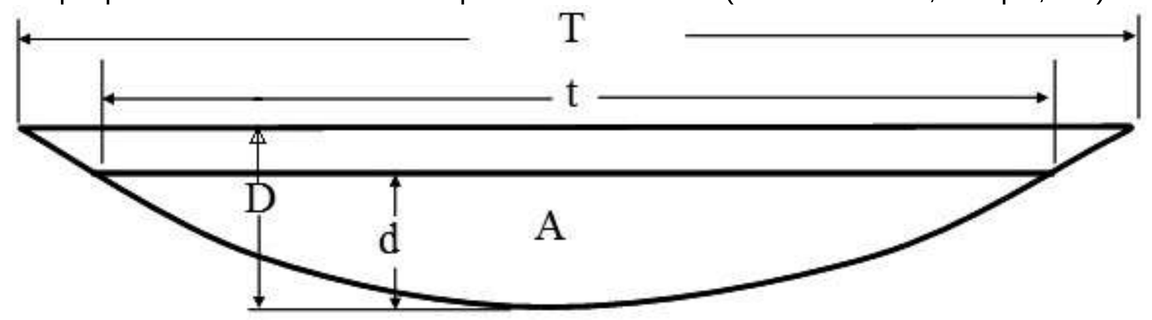


Figura 6.2: Sección transversal de un canal parabólico.

En la Figura 6.2. se indican los principales parámetros de diseño a definir en un canal de desagüe parabólico:

T = ancho máximo del canal considerando un margen de seguridad;
t = ancho máximo del canal considerando estrictamente el caudal de diseño;
D= profundidad máxima del canal considerando un margen de seguridad;
d = profundidad máxima del canal considerando estrictamente el caudal de diseño.
A= sección transversal de flujo de agua.

Tamaño del canal

La función de los canales es la de evacuar un determinado caudal de escurrimiento (Q) a una velocidad tal que no provoque erosión en él y que evite la sedimentación de partículas. El caudal de diseño, será el máximo que ocurre con una determinada probabilidad (período de retorno o recurrencia) para la cuenca que aporta al colector (Capítulo 2). Este período de recurrencia elegido dependerá de la seguridad que se quiera dar a las obras o tierras protegidas y expresa la probabilidad de que el canal rebalse por lo menos una vez en el período de años considerado (5, 10, 20, etc.).

La capacidad de desagüe del canal Q, es decir el máximo caudal que puede evacuar, está definido por la ecuación de continuidad (Chow *et al*., 1993):

$$Q = A \times V$$ **Ecuación 6.1**

siendo:

Q= caudal máximo para un determinado tiempo de retorno, en m^3/s;
A= sección transversal de flujo que escurre por el canal, en m^2;
V= velocidad de flujo, en m/s

La velocidad del agua en canales abiertos es una función de la pendiente, la condiciones de rugosidad del piso (coeficiente de rugosidad) y del radio hidráulico (relación entre la sección A y el perímetro de mojadura p). La expresión matemática que los vincula es la fórmula de Manning:

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{n}$$ **Ecuación 6.2**

donde:

V= velocidad de flujo, en m/s;
n= coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional)
R= radio hidráulico, en m;
S = pendiente del canal, en m/m;

$$R = \frac{A}{P}$$

donde:
A= sección transversal de flujo en m^2;
p= perímetro mojado en m.

La rugosidad superficial es un parámetro muy importante que controla la velocidad del agua que fluye. El coeficiente de rugosidad es a menudo considerado como la suma de los efectos impartidos por las partículas del suelo, microtopografía superficial (forma de los microrelieves) y de la vegetación, teniendo este último factor un papel más relevante que el resto de los factores mencionados. El grado de rugosidad estará dado por la morfología de la planta y por la densidad de crecimiento de la misma. En la Tabla 6.1 se indican coeficientes de rugosidad n, para diferentes condiciones de suelo y vegetación.

Tabla 6.1: Valores de coeficiente de rugosidad de Manning, n, para diferentes condiciones de cobertura y tratamiento del suelo. (Morgan y Rickson, 1995).

Cobertura o tratamiento	Residuo en superficie (t/ha)	Valor de n recomendado	Rango
Asfalto		0,011	0,01-0,013
Suelo arenoso desnudo		0,01	0,010-0,016
Suelo franco-arcilloso desnudo		0,02	0,012-0,033
Barbecho desnudo		0,05	0,006-0,16
Arado cincel	<0,6	0,07	0,006-0,17
	0,6-2,5	0,18	0,07-0,34
	2,5-7,5	0,30	0,19-0,47
	>7,5	0,40	0,34-0,46
Rastra de discos	<0,6	0,08	0,008-0,41
	0,6-2,5	0,16	0,10-0,25
	2,5-7,5	0,25	0,14-0,53
	>7,5	0,30	0,24-0,48
Labraza cero	<0,6	0,04	0,03-0,07
	0,6-2,5	0,07	0,01-0,13
	2,5-7,5	0,30	0,16-0,47
Arado de vertedera		0,06	0,02-0,10
Vegetación densa y alta (>60 cm)			0,06-0,20
Vegetación alta (25-60 cm)			0,04-0,15
Vegetación mediana (15-25 cm)			0,03-0,08
Vegetación corta (5-15 cm)			0,03-0,06
Vegetación muy corta (<5 cm)			0,02-0,04

Las velocidades se seleccionan en base al tipo de suelo (erodabilidad) y a las condiciones de la vegetación del canal (tipo, cobertura, altura), teniendo en cuenta que no deben provocar erosión en el fondo del cauce ni producir sedimentación. Esto último disminuye la sección de flujo y por lo tanto aumentan los riesgos de desborde del canal. En la Tabla 6.2 se dan valores orientativos sobre las velocidades máximas permitidas en canales de tierra.

Tabla 6.2: Velocidades máximas permitidas en canales de tierra.

	Velocidad máxima en cobertura herbácea esperada después de dos estaciones de crecimiento [m/s]		
Material/suelo	**Suelo desnudo**	**Cobertura normal**	**Cobertura muy buena**
Arena limosa muy fina	**0,30**	**0,75**	**1,50**
Arena suelta fina	**0,50**	**0,90**	**1,50**
Suelo arenoso	**0,75**	**1,50**	**2,00**
Suelo franco-arcillo firme	**1,00**	**1,70**	**2,30**

Existen dos procedimientos básicos para dimensionar canales empastados, uno está basado en la aproximación d=1,5*R (Fangmeier *et al*, 2006), que se discute a continuación, y otro es un método de prueba y error.

Para el primer procedimiento, una vez obtenido el caudal máximo que debe transportar el canal, la velocidad máxima permitida y el coeficiente de rugosidad, podemos encontrar el R que satisfaga la ecuación de Manning, despejando R de la ecuación 6.2.:

$$R = \left(\frac{v \times n}{S^{\frac{1}{2}}}\right)^{\frac{3}{2}}$$

Para canales de guarda la pendiente de diseño S se seleccionará en base a las posibilidades que brinde el relieve, pero no deberá superar el 0,6%.

La altura máxima en el centro del canal, d, para ese caudal máximo, resulta de la siguiente aproximación para canales parabólicos (Figura 6.2.):

$$d = 1.5 \times R$$ **Ecuación 6.3.**

El ancho máximo para ese caudal, t, surge del despeje de la ecuación de sección de una parábola, siendo:

$$T = \frac{3 \times A}{2 \times d}$$ **Ecuación 6.4.**

Para lo cual, se debe obtener el valor de A de la ecuación 6.1, ya que conocido el caudal Q y establecida la velocidad máxima permitida V se despeja de la Ecuación 6.1:

$$A = \frac{Q}{V}$$

A continuación se discute un ejemplo de cálculo. Se debe dimensionar un canal para desaguar una cuenca que eroga un caudal pico de 10 m^3/s, para una recurrencia de 10 años; la vía de desagüe tiene una pendiente media del 1 %, y se mantendrá bajo una condición de pastura permanente corta, en un suelo franco-arenoso. De la Tabla 6.1 se selecciona un valor de n = 0,04, y de la Tabla 6.2 un valor de velocidad máxima permitida del escurrimiento de 1,5 m/s.

Con los datos del problema despejamos R de la ecuación de Manning:

$$R = \left(\frac{1.5 \times 0.04}{0.01^{0.5}}\right)^{1.5} = 0.46\ m$$

Con la aproximación de la ecuación 6.3. resulta:

$$d = 1.5 \times 0.46 = 0.69 \approx 0.7\ m$$

Aplicando la ecuación de continuidad para obtener A:

$$A = \frac{10}{1.5} = 6.66\ m^2$$

Aplicando la fórmula de la sección de una parábola, obtenemos t:

$$t = \frac{3 \times 6.66}{2 \times 0.7} = 14.3\ m$$

Con lo cual, el canal proyectado debería tener una profundidad de 0,7 m y un ancho de 14,3 m. Agregando a cada dimensión un 10 % de márgen de seguridad (T y D de Figura 6.2.). Las dimensiones finales del canal son de 0,8 m de profundidad y 16 m de ancho aproximadamente.

Trazado

El canal de guarda desvía la dirección natural del escurrimiento, a diferencia del canal de desagüe que se realiza sobre una vía ya establecida. Es decir, lo conduce por una sección totalmente diseñada por un profesional. Por lo tanto, el lugar de emplazamiento dependerá del sector que se quiere proteger y de las posibilidades que brinda el relieve para su construcción. Se comenzará a marcar la traza del canal partiendo desde la desembocadura del canal de guarda en el canal de desagüe que evacuará las aguas de aquel, dándole, con el instrumento óptico correspondiente (nivel o teodolito) la pendiente de diseño. La traza se dejará estaqueada para después proceder a la construcción de la obra. Conviene realizar los movimientos de tierra una vez finalizada la estación de lluvias, luego de la cual se sembrará la pastura definitiva, la cual deberá tener el desarrollo y la cobertura adecuada antes del inicio de las lluvias más intensas.

6.2.2. Canales de desagüe

Son estructuras hidráulicas encargadas de conducir los excesos de escurrimiento en forma no erosiva. Su función es la de consolidar las vías naturales o artificiales de escurrimiento e impedir la erosión lineal (surcos o cárcavas). En áreas bajo riego su función es la de transportar el agua a los lugares de utilización con la mayor eficiencia posible; se utilizan además para la provisión de agua potable a poblaciones. En las áreas con problemas hidrohalomórficos se construyen además canales de drenaje, con el objetivo de deprimir los niveles freáticos, además de desaguar excesos de escurrimiento. Es importante clarificar la diferencia entre canal de desagüe y canal de drenaje. El primero cumple la función de conducir controladamente escurrimientos superficiales, que normalmente tienen baja carga salina y alta concentración de sedimentos. Los canales de drenaje cumplen además la función de deprimir los niveles freáticos, es decir se construyen con una sección diferente (angostos y profundos) y pueden transportar agua con alta carga salina, y menor contenido de sedimentos, en este caso los criterios de diseño y construcción son diferentes a los usados en conservación de suelos. Centraremos nuestra atención en canales de desagüe empastados, con fines de conservación.

Los canales utilizados en conservación tienen ubicación en cualquier tipo de cuenca que presente excesos de escurrimiento que deben ser conducidos y evacuados y que permitan una cobertura vegetal (Figura 6.3).

Es una práctica básica para la consolidación de la red de desagüe, por lo que debe estar integrada con todas las demás obras que tengan ese objetivo (canales interceptores, defensas de cabeceras, microembalses) dentro de la visión de cuenca. Como práctica aislada, su eficiencia dependerá del estado del cauce en el que se plantea el canal; si el canal finaliza en una cárcava no controlada, el efecto será la rectificación del avance de la cárcava por la traza del canal.

El procedimiento de cálculo para el dimensionamiento es similar al visto para canales de guarda. La diferencia está en que en canales de desagüe, la pendiente S estará dada por la pendiente natural del cauce y no es una variable controlada por el diseñador, como en los canales de guarda.

La construcción se puede realizar con maquiñaria convencional (arado rastra, arado de discos) o especial (motoniveladora). Para cauces ya erosionados en surcos, sin cabeceras de cárcavas, se puede lograr una forma parabólica del canal mediante el albardonado interno del cauce y su posterior empastado, de manera que el flujo atraviese la sección calculada (Figura 6.4). Las características de este tipo de albardonado se verán en las prácticas de control de cárcavas.



Canal de desagüe de sistematización (NRCS-USDA)

Trazado de canal de desagüe (NRCS-USDA)



Canal de desagüe de sistematización (Ontario, Canadá)



Canales de desagüe principal y canal secundario (Dpto. Rio Cuarto, Córdoba) (UNRC-SECYOT).

Figura 6.3: Canales de desagüe empastados.



Figura 6.4: Albardonado del cauce para lograr la forma parabólica del canal.

Una variante de diseño de canales, cuando quiere evitarse un excesivo movimiento de suelo es el llamado canal de bordos (Luque, 1997). Este tipo de canal se emplaza sobre la sección actual de una vía de desagüe empastada, y se determina su sección mediante la construcción de bordos longitudinales, que son los que determinarán la circulación del flujo. De este modo la sección de paso del agua ya previamente empastada, permite un funcionamiento relativamente seguro del desagüe y los bordos laterales evitan los posibles desbordes hacia la tierra de cultivo. En la Figura 6.5 se muestran las características de un canal de bordos.



Figura 6.5: Sección transversal esquemática de un canal de bordos.

El dimensionamiento de este tipo de canal se puede realizar con buena aproximación considerando la teoría de canales parabólicos. Su principal ventaja es el ahorro en movimiento de suelo y su seguridad al estar la sección de flujo ya empastada. Su inconveniente es que dificulta el ingreso de escurrimientos difusos desde los laterales, para lo cual hay que realizar aberturas en el canal, que pueden provocar su desborde.

La vida útil de un canal depende de las condiciones de praderización que se logre en el mismo. Si bien es un sector de suelo que está destinado a la función de evacuación de excedentes, es tierra productiva que debe ser aprovechada convenientemente, ya sea a través de cosecha directa con hacienda o cosecha mecánica del pasto. La condición de funcionamiento ideal es de una pastura de no más de 15 cm de altura, para lo cual es necesario un permanente mantenimiento con desmalezadora para lograr dicha condición.

Es conveniente además, dejar una sección empastada a cada lado del canal a los fines de que funcione como trampa de sedimentos, reduciendo la carga de suelo suspendido que entra a la zona del canal. De esta forma se logra incrementar la vida útil y se evita la pérdida de capacidad de transporte por efecto de la sedimentación en el canal.

6.3. Técnicas de control de cárcavas.

La erosión en cárcavas o barrancos es la manifestación extrema del proceso de erosión hídrica, ya que implica un deterioro irreversible del recurso suelo. La erosión en cárcavas se produce por una particular combinación de factores de clima, relieve, suelo y de las acciones humanas (Capítulo 3).

El inicio de las cárcavas ocurre generalmente en los lugares con cambios abruptos de pendiente, desde las de alto gradiente a las planas. En esos lugares, la energía del agua se disipa, absorbiéndola el material del suelo, que se desagrega, produciéndose un pequeño salto. Esa diferencia de nivel aumenta la energía de caída que debe absorber la base del salto, por lo tanto la desagregación es más intensa. El avance de la barranca se produce en dirección inversa a la del flujo (retrocedente) y es un proceso de retroalimentación positiva, es decir que a medida que avanza la barranca, su altura es cada vez mayor, por lo tanto lo es también la energía potencial puesta en juego.

De las características del suelo y subsuelo que hagan a su mayor o menor resistencia a la degradación, dependerá la magnitud del proceso erosivo en barrancas, especialmente de su profundidad. La existencia de "pisos" dentro de la cárcava

responde a diferentes condiciones de estabilidad del subsuelo (roca viva, tosca, horizontes densificados, B2t, etc.). Las condiciones de baja estabilidad de la mayoría de los materiales originarios de la región centro-sur de la provincia de Córdoba son una de las causas de la existencia de cárcavas de grandes dimensiones. En la Figura 6.6 se esquematizan los componentes de una cabecera de cárcava y el proceso de avance retrocedente.

Se llama cabecera al sector activo de una cárcava, por donde se produce su avance, el piso de la cárcava es el sector que ya ha sido erosionado y es por donde circula el escurrimiento que ingresa a la cárcava, las paredes laterales también pueden sufrir erosión, en la medida que no se estabiliza el piso (Figura 6.7).

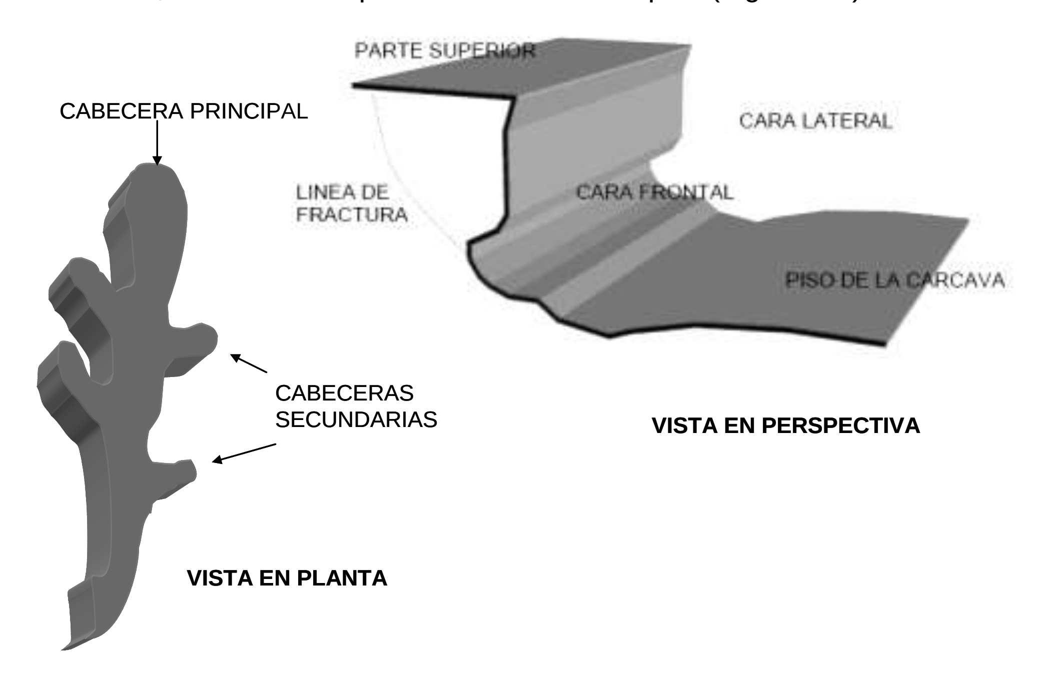


Figura 6.6: Esquema de componentes de una cárcava.



Figura 6.7: Cárcavas activas en la región de Río Cuarto (Córdoba) (UNRC-SECYOT).

6.3.1. Principios de control de cabeceras de cárcavas.

Las técnicas de control de cabeceras de cárcava son estructuras hidráulicas construidas sobre las cabeceras de cárcavas con el objetivo de detener el avance retrocedente y la profundización de los niveles de base de los cauces de desagüe afectados por este tipo de erosión.

Como se analizó en el Capitulo 3, el avance de la cárcava se produce por la acción combinada de la erosión en el piso al caer el agua desde la cara superior, el humedecimiento y debilitamiento del bloque por una línea de fractura, y su posterior desprendimiento. En base a ello los principios de control de cabeceras son (Ver Figuras 6.6 y 6.7 para referencias):

- Aislamiento de la parte superior de la cabecera, minimizando la infiltración de agua en el suelo en un área inmediatamente antes del corte de la cárcava. De este modo se evita que el bloque aumente de peso y caiga;
- Protección del piso y cara frontal de la cárcava. Se evita de este modo el socavamiento del fondo y de la pared inferior y el desprendimiento del bloque;
- Protección de las paredes laterales: Los taludes laterales deben estabilizarse para evitar su crecimiento en ancho (las técnicas de bioingeniería para taludes se discuten en el Capítulo 7).
- Entrada única del agua: el agua debe entrar a la cárcava solo por una entrada protegida, normalmente por la cabecera principal. De no aislarse el ingreso al resto de las cabeceras secundarias (Figura 6.6.) se producirán otras cabeceras, en cada una de ellas. Dicha entrada deberá tener suficiente capacidad como para evacuar el escurrimiento máximo calculado para la cuenca en ese punto.
- Aislamiento: Se evitará la entrada de animales, tanto a las estructuras y obras complementarias, como dentro de la cárcava para impedir el pisoteo y pastoreo de la vegetación. Ésto al menos en los primeros años de la estabilización. Una vez lograda puede realizarse un aprovechamiento ganadero o forestal de la cárcava.

6.3.2. Técnicas de control de cabeceras de cárcavas

Vertedero y estructura fija

Son estructuras de mampostería que protegen las paredes laterales, frontal, piso y parte superior de la cabecera, mediante muros de ladrillo, piedra, gavión u hormigón armado (Figura 6.8). Su planteo y construcción debe ser supervisada por ingenieros civiles o hidráulicos, ya que requiere diseño hidráulico, cálculo de estructuras, fundación y construcción civil.

Se utiliza en cualquier tipo cárcava, siendo la práctica más costosa, por lo tanto requiere la aplicación de factores de seguridad altos (tiempo de recurrencia largos para la lluvia de diseño). Por su alto costo, es conveniente ubicarla en los lugares más estratégicos de la cuenca, que permita costearla entre todos los beneficiarios de la obra, por ejemplo en lugares de interés comunitario como sitios con peligro de rotura de caminos, puentes, o alcantarillas. Su utilidad principal está en cárcavas de tamaño medio a alto.

La caída del agua se produce en el colchón hidráulico, (también llamado batea difusora o disipador de energía), pudiendo variar en cuanto al diseño de caída, el cual puede ser recto (a 90 º), inclinado, curvo o tipo escalera. Distintos tipos de caída de defensas con estructura fija se muestran en la Figura 6.9.

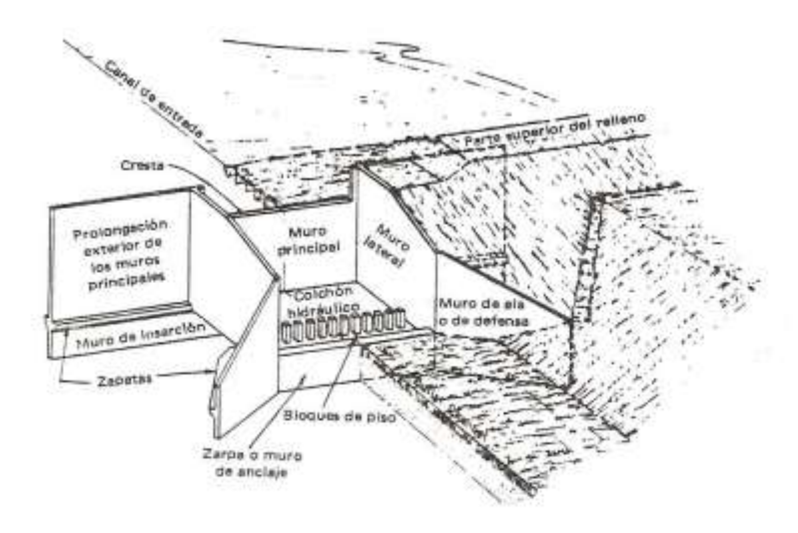


Figura 6.8: Protección de cabecera de cárcava mediante un vertedero de estructura fija (Tomado de Fangmeier *et al*., 2006).



Estructura fija con caída en ángulo recto, con vertedero en cajón (arriba) y recto (abajo, SCS-USDA)



Estructura fija con caída en plano inclinado, con regulador de escurrimiento (UNRC-SECYOT)



Estructura fija con caída en ángulo recto con vertedero recto (UNRC-SECYOT).



Estructura fija con escalera de gabión (UNRC-SECYOT).

Figura 6.9: Tipos de estructura fija para protección de cárcavas.

El principal parámetro a definir para el diseño de este tipo de obras, es la dimensión del vertedero o cresta, es decir, para un vertedero rectangular como el de las Figuras 6.8, 6.9 y 6.10, las dimensiones ancho del vertedero (L) y altura del pelo de agua en el vertedero (h). Al igual que para los canales empastados, estas dimensiones están determinadas principalmente por el caudal pico que deberá desaguar la obra de defensa. La diferencia principal entre canales empastados y estructura fija es la selección de la tormenta de diseño, en el primer caso se mencionó que debería estar en el orden de 10 años, mientras que en estructuras fijas, el período de retorno debería ser de por lo menos 25 años.

La capacidad de desagüe del vertedero rectangular de este tipo de estructura fija se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q = \frac{0.82 \times L \times h^{\frac{3}{2}}}{0.336 + 0.01 \times F}$$ **Ecuación 6.5**

donde:

Q= capacidad de desagüe en, m^3/s;
L= ancho del vertedero en, m;
h= altura del pelo de agua en el vertedero, en m.
F = altura del salto o altura de la cárcava, en m.

Conociendo Q, el caudal máximo en el punto donde se va a construir la estructura, la altura del salto F (igual a la de la cárcava) y fijando un valor de h, que puede ser en función de la altura del canal de desagüe, se obtiene el valor de L, el ancho del vertedero, despejando de la ecuación 6.5.

El resto de los parámetros de diseño señalados en la Figura 6.10 se indican a continuación:

$$E = (3 \times h) + 0.61$$
$$J = 2 \times h$$
$$Lb = F \times \left(\frac{2.28 \times h}{F} + 0.52\right)$$
$$M = 2 \times \left(F + \frac{4}{3 \times h} - J\right)$$
$$K = Lb + 0.13 - M$$
$$P = 2.82 \times (J - S - 0.31)$$
$$W = S + 0.03$$
$$S = \frac{h}{3}$$

Como ejemplo de cálculo, se diseña una estructura de defensa de cabecera de cárcava en base a un vertedero con estructura fija, para los datos del problema de canales empastados de la Sección 6.2.1, considerando una cárcava de F = 3 m de altura. Para este caso por ser una obra que requiere un mayor tiempo de retorno, se adoptará un caudal pico Q = 12 m^3/s, se toma un valor de h similar al que se estimó para el canal de desagüe del problema anterior (d = h = 0,8 m), con lo cual el ancho del vertedero quedará:

$$L = 12 \times \frac{0.336 + 0.01 \times 3}{0.82 \times 0.8^{\frac{3}{2}}} = 7.57\ m$$

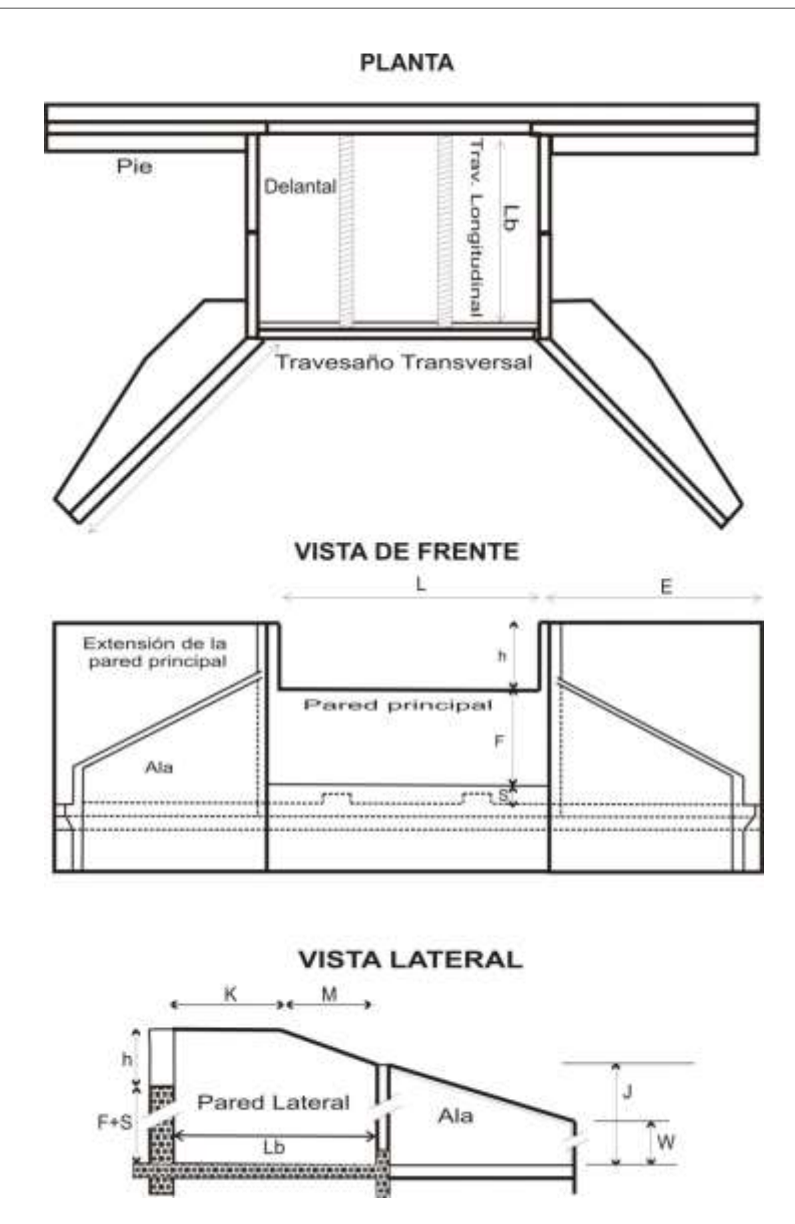


Figura6.10: Dimensiones de un vertedero de estructura fija (Tomada de de Fangmeier *et al*., 2006)

Saetín de cabecera o tobogán

Esta práctica consiste en el rebajado de la cabecera de la cárcava, de manera tal que quede con una pendiente uniforme y en la construcción sobre la misma de un canal revestido de mampostería u hormigón. En la base del canal se emplaza la batea difusora o disipador de energía.

Se puede utilizar en cualquier tipo de cárcava; se aconseja para cárcavas no mayores a 4 metros de profundidad, límite a partir del cual, la energía a disipar es excesiva. También se pueden usar materiales alternativos al hormigón, como colchonetas de gabión (piedras y alambre tejido), chapas de zinc, hormigón ciclópeo (piedra y hormigón), bloques, geotextiles con vegetación, etc. En la Figura 6.11se presenta un esquema de este tipo de estructura y en la Figura 6.12 una estructura en base a bloques.

La capacidad del vertedero de entrada se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$Q = 2.11 \times L \times h^{\frac{3}{2}}$$

con la que se opera de igual forma que en la estructura fija. Las restantes dimensiones se detallan en la Figura 6.11.

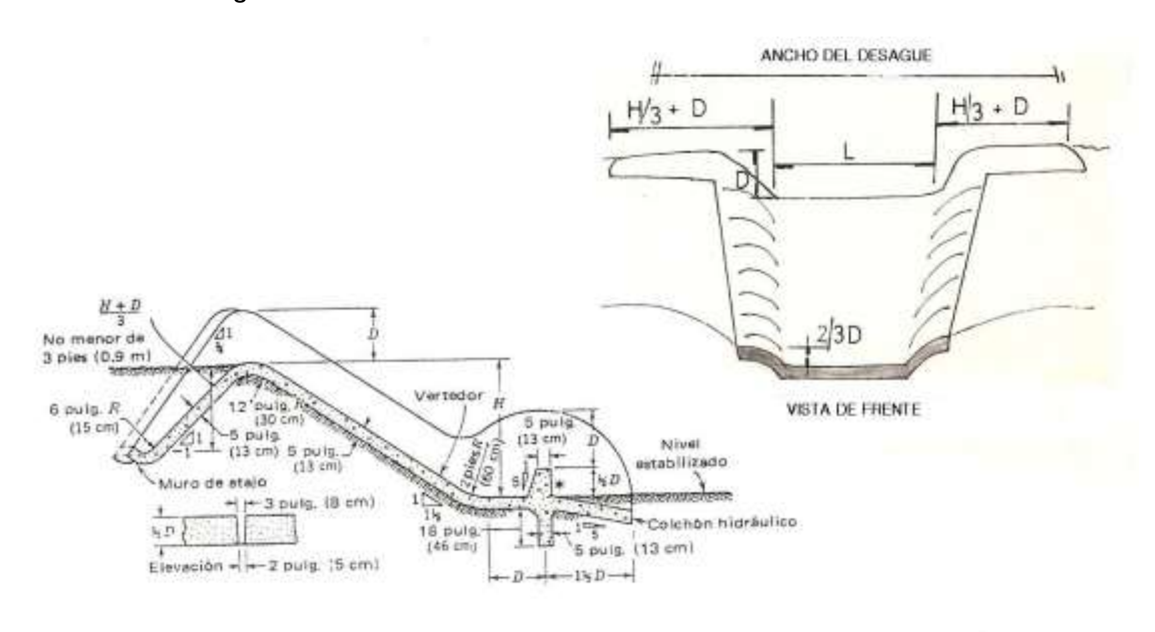


Figura 6.11: Características del saetín de cabecera, tobogán. Dimensionamiento (Tomado de Fangmeier et al.*, 2006).*





Figura 6.12: Tobogán o saetón de defensa de cabecera de de cárcavas hecho con bloques. (www.prairiestateoutdoors.com).

Toda obra de defensa que requiera la entrada única del agua por la zona protegida, requiere de obras complementarias que cumplan esta función. Estas obras son los albardones de embocadura y los canales interceptores. Permiten que el agua sólo ingrese a la cabecera o a zonas sin peligro de erosión, de modo de evitar el crecimiento de cabeceras secundarias. Se describen a continuación:

- Albardones de embocadura: Consisten en estructuras de tierra que impiden la entrada de agua por los laterales de la barranca. Se construyen a manera de embudo colector, perpendiculares o con un cierto ángulo respecto a la dirección de flujo; esquemáticamente se muestran en la Figura 6.13.

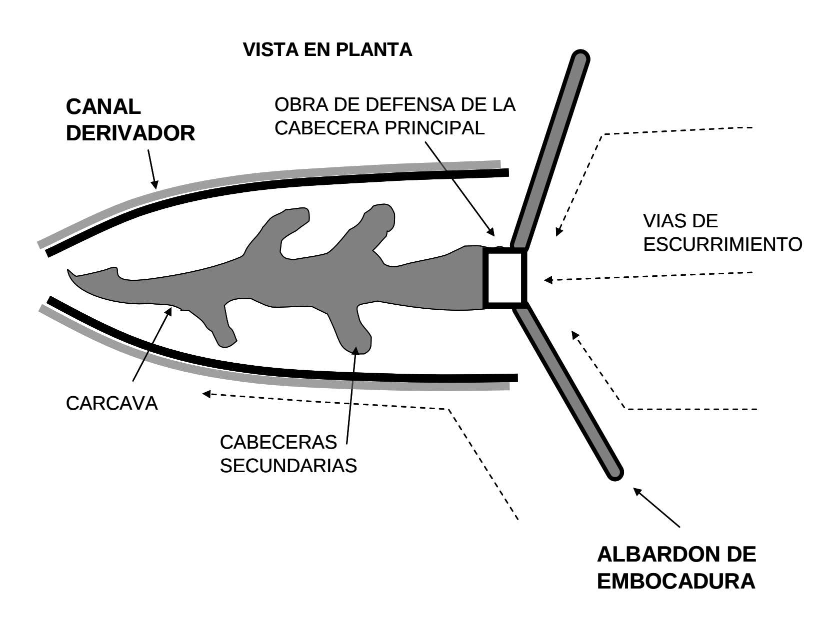


Figura 6.13: Esquema de obras complementarias de defensa de cabeceras de cárcavas. Albardones de embocadura y canales derivadores.

Aun cuando la estructura de defensa de cabecera se construya a la salida de un canal de desagüe parabólico, conviene que los albardones estén presentes. Esto es debido a que ambas obras (el canal y la estructura) se calculan con distintos períodos de retorno; generalmente los canales se dimensionan para caudales menores que la estructura, por ello aunque el canal venga desbordado, los albardones impiden la entrada lateral de agua a la cárcava.

- Canales derivadores: Son estructuras ubicadas en forma paralela a la cárcava que tienen por objeto impedir el ingreso a la misma del agua proveniente de áreas aledañas, evitando de ese modo la formación de nuevas cabeceras secundarias, perpendiculares al cauce principal. Su disposición se muestra en la Figura 6.13 y 6.14 Su dimensionamiento se verá en la práctica de albardón con desagüe lateral protegido.



Figura 6.14: Albardones de protección y canales derivadores para protección de estructuras de defensa de cabecera (UNRC-SECYOT).

Suavizado y albardonado de cabecera

Esta técnica consiste en realizar un suavizado (también llamado ataludado) de la cabecera de la cárcava, como forma de evitar el salto hidráulico. Luego el suavizado se protege mediante albardones y empastado, de manera de evitar la erosión de la pendiente, hasta que el flujo alcanza su velocidad mínima a nivel del piso de la cárcava.

Se puede utilizar en cualquier tipo de cárcava que permita modificar la sección de entrada para evacuar el caudal previsto. La profundidad de la cárcava debe permitir el uso de maquinaria pesada (topadora, motoniveladora o pala cargadora) para efectuar el desmoronamiento del filo de la pared frontal de la cárcava y luego suavizar la cabecera con arado, motoniveladora o con la misma topadora (Figura 6.15).



Suavizado reciente de cárcava



Cárcava suavizada y albardonada.

Figura 6.15: Suavizado o ataludado de cabecera de cárcava (UNRC-SECYOT).

Las dimensiones de la entrada a la zona de la cabecera suavizada deberán ser iguales a las del canal de desagüe que finaliza en la cárcava, como se analizó en el apartado de canales. A medida que se ingresa en la cárcava, el ancho suavizado irá siendo menor hasta terminar siendo igual al ancho del piso de la cárcava (Figura 6.16). Respecto a la pendiente del talud suavizado, no deberá ser mayor al 10 % (Figura 6.17).

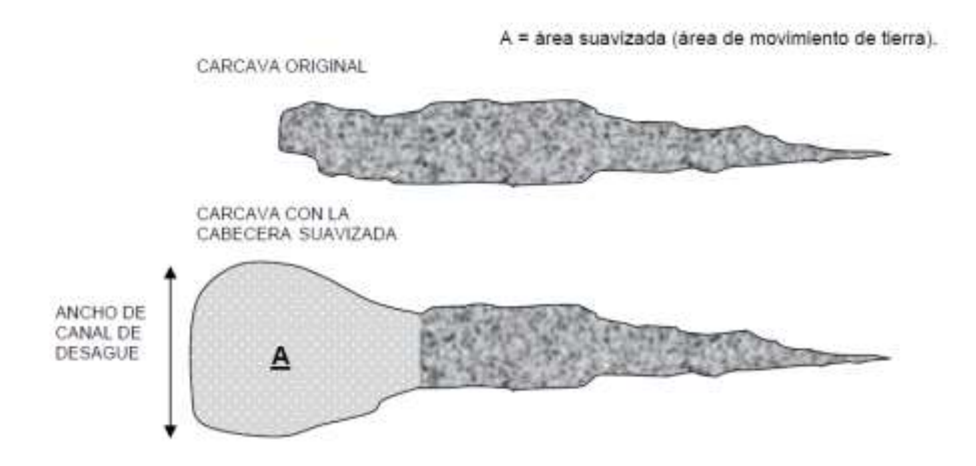


Figura 6.16: Esquema de suavizado de cabecera de cárcava.

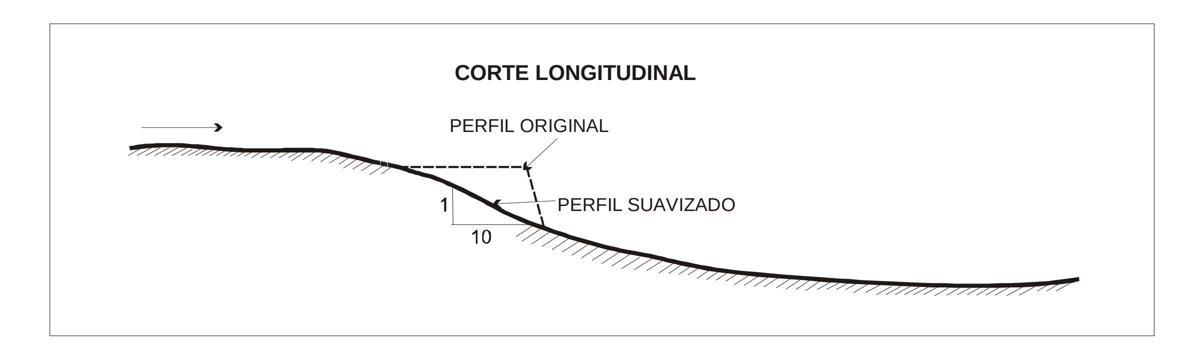


Figura 6.17: Pendiente del talud suavizado de una cabecera d cárcava.

Para evitar la erosión sobre el declive de la obra, se deberá construir una serie de albardones que disminuyan la velocidad del agua sobre el talud. El fundamento de la protección con albardones está en su funcionamiento "ahogado" o bajo un colchón de agua. Esto se logra colocando los albardones con una separación tal que la proyección horizontal de la cresta de uno, coincida con la mitad de la altura del inmediato superior, (Figura 6.18).

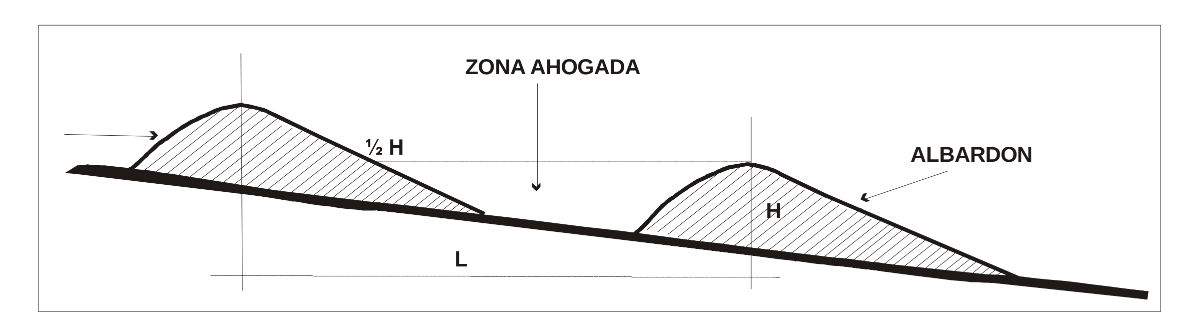


Figura 6.18: Disposición de albardones en la pendiente de una zona suavizada de cárcava. Esquema de funcionamiento “ahogado”.

De esta manera se asegura que el escurrimiento al pasar de un albardón a otro, encuentre un colchón de agua en donde disipar su energía. La distancia L entre albardones sale de la siguiente relación:

$$L = \frac{H}{2 \times S} \times 100$$

siendo:

L = distancia entre albardones,
H = altura del albardon, varía entre 0,4 - 0,6 metros,
S = pendiente del talud suavizado.

El albardón debe tener una relación alto/largo de 1:5 para disminuir la velocidad del agua y evitar que se socave en el extremo inferior (Figura 6.19).

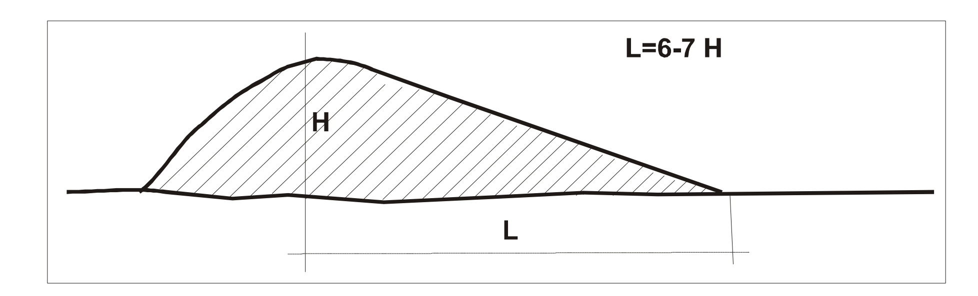


Figura 6.19: Relación alto: largo de los albardones.

La disposición de los albardones deberá ser tal, que definan una sección parabólica de paso de agua; no se trata de impedir el flujo, sino de que éste se produzca en forma no erosiva. En la Figura 6.20 se muestra un esquema de la posible disposición de los albardones en la zona suavizada y en la Figura 6.21 ejemplos de aplicación de la técnica.

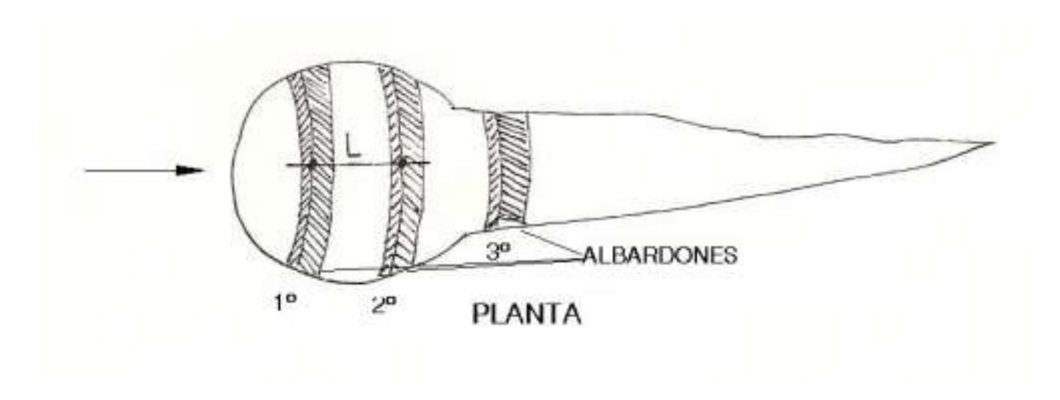
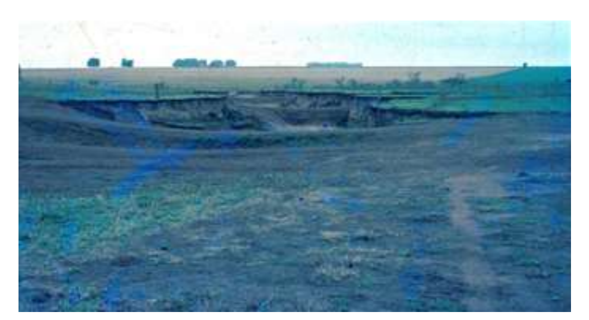


Figura 6.20: Disposición de los albardones en el suavizado y albardonado de cabeceras de cárcavas.



Vista desde aguas abajo del último albardón de la cabecera.



Cabecera de cárcava estabilizada mediante albardones.

Figura 6.21: Suavizado y albardonado de cabecera de cárcava (UNRC-SECYOT).

Toda la obra depende de la etapa de consolidación, la cual se puede realizar mediante una adecuada compactación y praderización, tratando de hacerlo con el piso húmedo o mojado. Luego podrán sembrarse o plantarse especies con rápido cubrimiento (gramilla, gramón, raygrass, trébol blanco, etc.). El pisoteo de la hacienda en la primera etapa de consolidación puede ser necesario para brindar mayor estabilidad al talud y a los albardones. Luego debe ser retirada para posibilitar el crecimiento del pasto.

Este tipo de estructuras de tierra, si bien son relativamente económicas, requieren un mantenimiento constante por la rotura de albardones, rebalse por los laterales y permanentes resiembras. Para la consolidación del piso suavizado también puede usarse suelo-cemento, consistente en la mezcla de ambos componentes en una relación 8:1.

Aleros o voladizos

Los aleros son técnicas consistentes en la construcción de una estructura voladiza sobre la cabecera de la cárcava, que conduzca el agua y la descargue alejada de la pared frontal, de manera que la energía de la cascada no produzca el socavamiento del fondo de la cárcava.

Se puede realizar en cualquier tipo de cárcava, no siendo una limitante la altura de la misma. Es de construcción relativamente accesible, ya que sólo requiere chapas de zinc, postes, alambre y brea, aunque también puede construirse en hormigón armado.

Sus características de economía y los materiales que requiere (todos recuperables) definen una vida útil relativamente corta (5 a10 años), por lo tanto los caudales de diseño podrán ser menores que los estimados para obras de mayor costo. No obstante existen obras de este tipo que llevan más de 30 años de vida (Figura 6.22).



Alero de chapa (Almafuerte, Dpto, Tercero Arriba, Córdoba)



Alero de chapa (La Barranquita, Dpto. Rio Cuarto, Córdoba)



Detalle de soporte de alero de chapa.



Vista general de alero con protección de chapa.

Figura 6.22: Aleros de defensa de cabecera de cárcava (UNRC-SECYOT).

Como en todas las obras deben tenerse en cuenta los principios de control ya discutidos: protección de la parte superior, piso, cara frontal y laterales de la cárcava. La cara superior se protege con la estructura de chapas, el piso se protege con un zampeado de piedras o cajón de piedras, o simplemente con un colchón de agua que se genera en la zona de choque de la cascada. La cara frontal se protege con una pared rústica de chapas, al igual que los laterales. En la figura 6.23 se esquematizan las partes constitutivas de un alero de chapa.

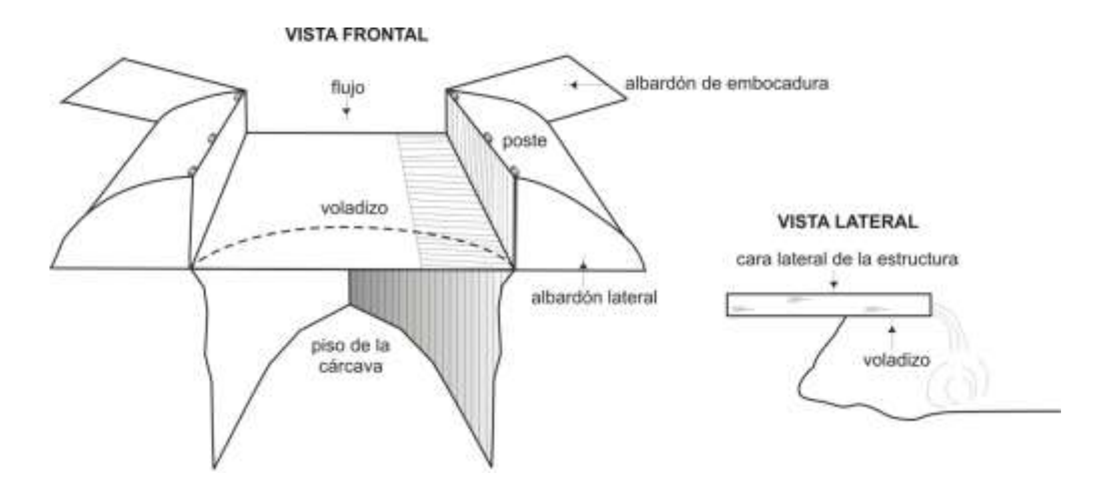


Figura 6.23: Esquema de las partes constitutivas de un alero de chapa para control de cabeceras de cárcava.

En el diseño de esta estructura deben tenerse presentes los siguientes aspectos básicos de diseño y construcción:

- Capacidad del vertedero.
- Fuerzas que actúan sobre el alero (soporte de la estructura).
- Protección de los cuatro puntos claves de la cárcava.

El período de retorno para seleccionar la tormenta de diseño podrá ser menor que en el caso de la estructura fija, ya que los costos son menores en el caso de los aleros. Si el veredero es rectangular se puede usar la misma expresión que en el caso de la estructura fija (Sección 6.3.1.). Puede diseñarse también con un vertedero trapecial de talud lateral 4:1, en cuyo caso la capacidad de descarga Q será:

$$\boldsymbol{Q = 1.86 \times L \times h^{\frac{3}{2}}}$$

En cuanto a la consideración de las tensiones y fuerzas que actúan sobre el alero, y que dan fundamento a los dispositivos de soporte, se indican en la Figura 6.24.

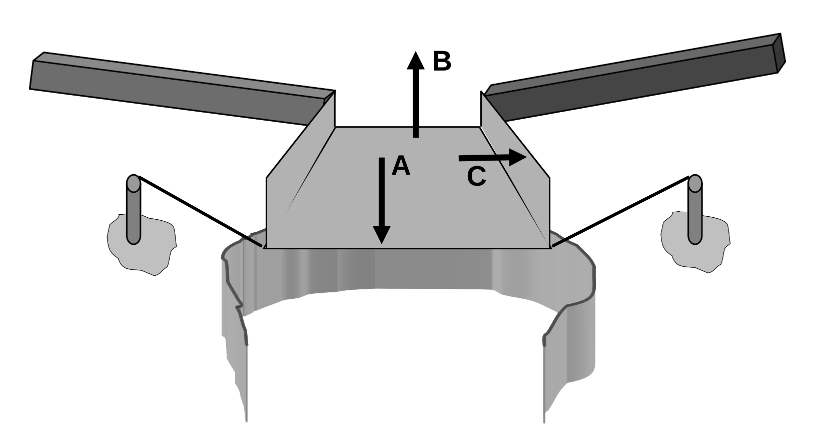


Figura 6.24: Fuerzas que actúan sobre el alero.

La fuerza A la ejerce el peso del agua sobre la estructura voladiza (que no está apoyada en tierra) y tiende a doblar las chapas o bien a "volear" la estructura (fuerza B). La fuerza C es la componente del peso del agua que actúa presionando sobre las paredes laterales de la estructura. La fuerza A es contrarrestada mediante el tendido de un cable o alambre de acero por debajo del voladizo y que se apoya en dos postes esquineros ubicados a ambos lados de la estructura (Figura 6.25).

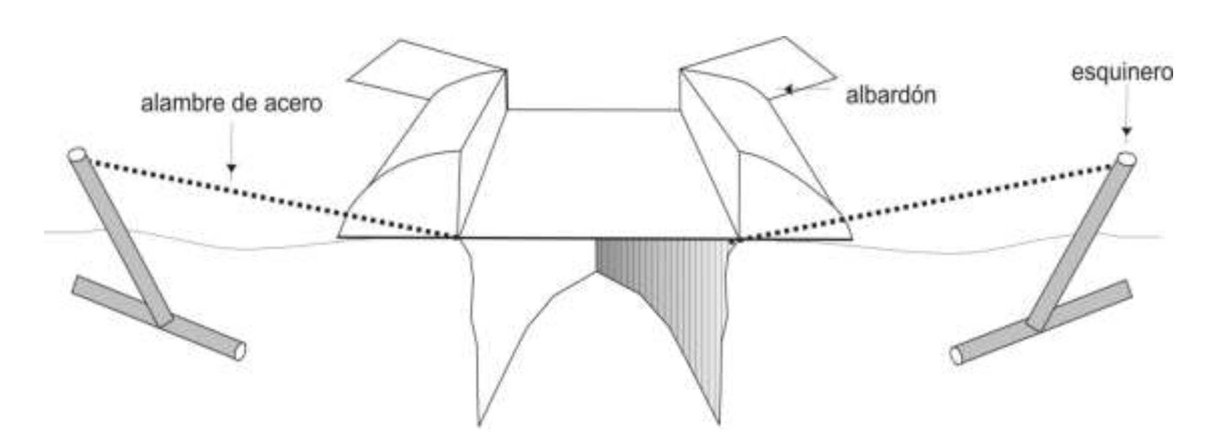


Figura 6.25: Esquema de estabilización del alero mediante tensores de alambre de acero.

La fuerza B debe ser anulada para evitar el "voleo" de la estructura, lo cual se puede lograr clavando las chapas en postes enterrados a manera de columnas y vigas. La fuerza C se anula mediante albardones sobre los que se apoyan las paredes laterales de chapa de la estructura (Figura 6.25).

La protección de la cara superior se logra evitando la infiltración de agua a través de las chapas, las que deben estar impermeabilizadas. Puede ser mediante bolsas embreadas, membrana para techos o con cualquier otro tipo de aislante. Es importante evitar el goteo en el extremo del voladizo hacia la cara frontal de la cárcava, lo que se consigue dándole pendiente a la estructura y colocando algún dispositivo antigoteo en el extremo del voladizo.

La protección del piso se puede conseguir con estructuras de cemento (tipo batea, tipo pileta o lisa), con chapas clavadas a postes, con piedra y alambre, etc. La ubicación de la batea coincidirá con la distancia del agua al caer libremente. En algunos casos la batea difusora se forma naturalmente en el piso de la cárcava, esto ocurre debido a que el agua al caer de la estructura genera una especie de pileta que, al permanecer llena de agua, actúa como disipadora de la energía de caía.

Para la protección de la pared frontal y laterales de la salpicadura y turbulencia mediante, se puede realizar un recubrimiento con chapas clavadas en postes enterrados y afirmados a la pared.

Las paredes laterales se erosionan por efecto del oleaje que produce la caía del agua; pueden protegerse por medio de una empalizada con postes, estacas (álamo, olmo, sauce); entre las hileras de estacas se puede colocar alambre tejido, ramas de poda y cualquier material que absorba la energía del agua y permita ir atrapando los sedimentos.

Albardón con desagüe lateral protegido

Es una práctica que consiste en el aislamiento hidrológico de la barranca mediante un albardón derivador que desvía las aguas antes de la cabecera y las conduce por un canal de desagüe protegido paralelo a la cárcava (Figura 6.26).

Se pueden utilizar en cualquier tipo de cárcava, con la restricción de que la topografía a ambos lados de la misma (o al menos un lado) permita la construcción de un canal, que finalmente derive las aguas hacia una zona no afectada por la cárcava. En casos en que la cárcava finalice en cauces permanentes profundos, la salida del desagüe lateral protegido al arroyo o río deberá llevar la defensa correspondiente, de lo contrario se producirá una nueva cárcava sobre el canal lateral.

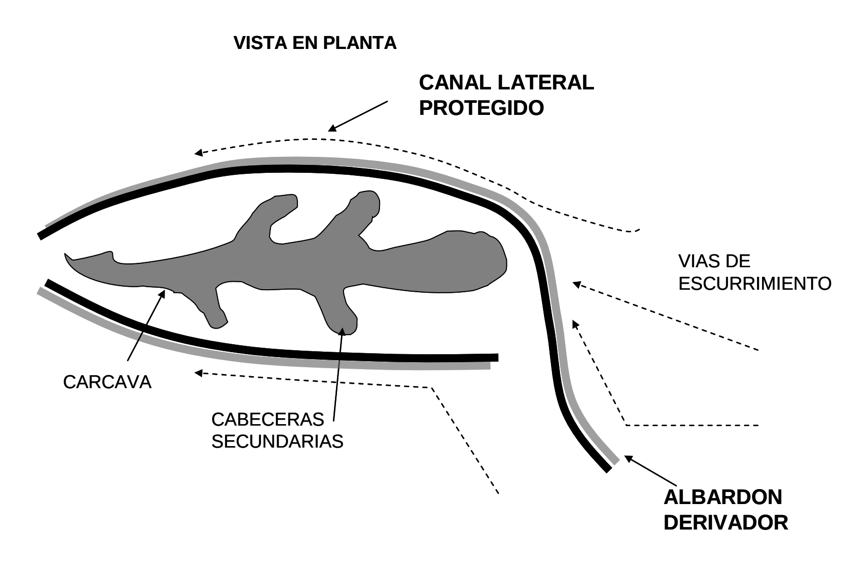


Figura 6.26: Esquema de defensa de cárcava mediante albardón con canal de desagüe lateral protegido.

Las dimensiones del canal deberán calcularse para caudales máximos, con períodos de recurrencia intermedios entre los del canal y los de estructuras fijas (5 - 10 años). Los criterios para el dimensionamiento ya fueron discutidos en el Apartado 6.3.1.

Cuando no fuera posible construir un canal paralelo, se puede estimar la capacidad de desagüe del albardón, considerando la sección de flujo y una velocidad del agua estimada. Puede utilizarse un procedimiento aproximado en donde la sección de flujo A se puede calcular gráficamente según la Figura 6.27.

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

luego:

$$Q = A \times V$$

donde:

V= estimada por ecuación de Manning;
A= conocida gráficamente (mediante instrumental óptico);
n= conocidoo a partir de la tabla 6.1;
R= calcular gráficamente, R = A/p

De esta manera se puede encontrar una altura de albardón que permita evacuar el caudal máximo. Este tipo de canal derivador se utiliza también para evitar el ingreso de agua a la cárcava proveniente de las zonas adyacentes, ya que estos ingresos son focos de ramificación lateral de la barranca. Esta práctica en las restantes obras figura como obra complementaria.

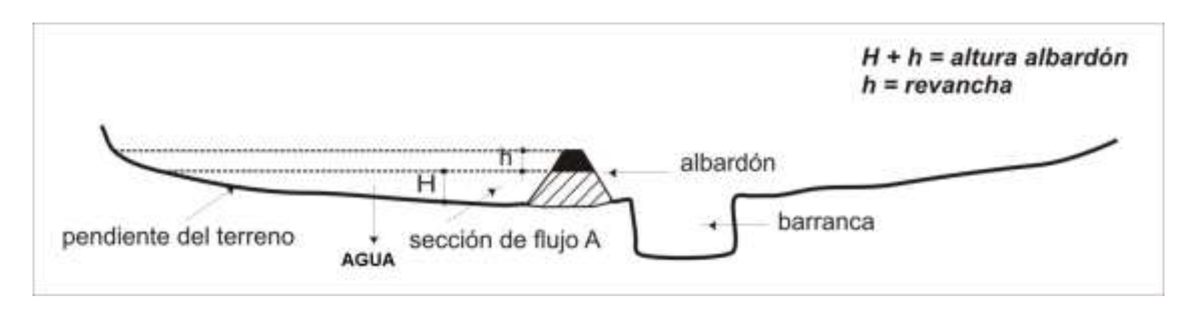


Figura 6.27: Procedimiento gráfico para estimar la capacidad del canal lateral.

6.3.3. Técnicas de recuperación del piso de cárcavas

El control del avance de la cabecera de cárcava es la primera parte del control integral de este tipo de erosión y permiten detener sólo el frente de avance. Las técnicas que se discuten a continuación permiten evitar la erosión del piso y laterales de la cárcava y recuperar el nivel de base original del terreno, o al menos evitar que éste siga disminuyendo. A las prácticas de recuperación de piso se las conoce genéricamente como rastrillos de retención o trampas de sedimentos.

Los fundamentos de las técnicas de recuperación de piso se basan en la disminución de la velocidad de circulación del agua dentro de la cárcava y como resultado se espera obtener la depositación del material que lleva el escurrimiento en suspensión. Dicho efecto se logra interponiendo algún tipo de obstáculo a la circulación del flujo, a los fines de aumentar los coeficientes de rugosidad y por consiguiente reducir la velocidad de la corriente.

La elección de las prácticas de recuperación de piso se basan en los siguientes criterios:

- Profundidad de la cárcava, por la posibilidad de parabolizado de la sección;
- Características del piso, por el tipo de material, presencia de toscas, presencia de napa, etc.;
- Pendiente del piso para definir el espaciamiento de los obstáculos.

El elemento de la estabilización del piso es la vegetación herbácea, de ahí que todos los aspectos que la afectan, inciden sobre el éxito de la recuperación de las cárcavas. Todas las técnicas requieren de un mantenimiento constante, ya que están sentadas sobre un ambiente altamente inestable, sujeto a condiciones extremas (sustrato calcáreo, tosca) y cambios bruscos (grandes caudales concentrados).

A continuación se discuten algunas de las técnicas de recuperación de los suelos de cárcavas.

Albardonado del interior de la cárcava

Consiste en la disposición de albardones transversales a la dirección de flujo en el interior de la cárcava, según los criterios discutidos en el suavizado de cabeceras (Apartado 6.3.3).

La tierra necesaria para construir los albardones se puede extraer volteando los taludes de la cárcava, en este caso se realiza un parabolizado de la sección de la cárcava solamente donde va ubicado el albardón (Figura 6.28). La tierra extraía de A se utiliza para construir el albardón B.

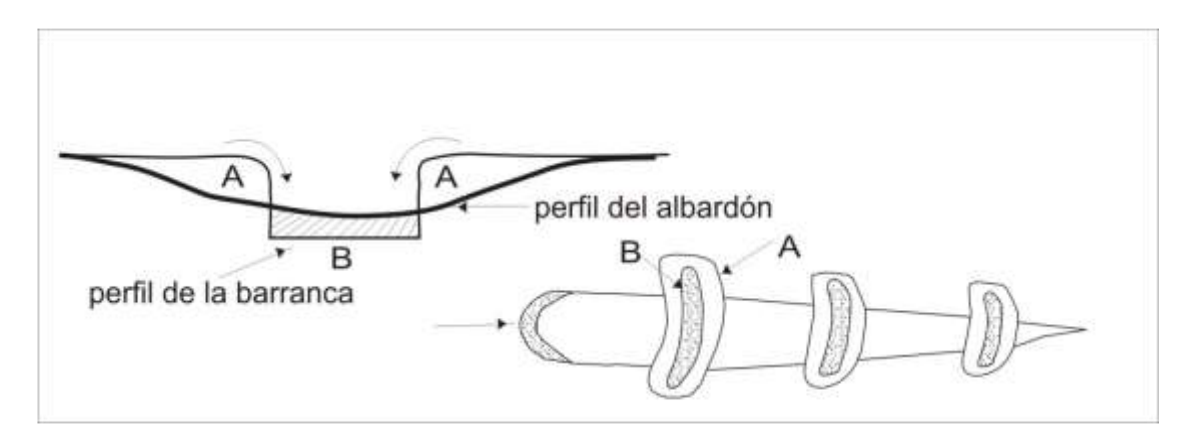


Figura 6.28: Recuperación de pisos de cárcavas mediante albardonado interior.

El agua debe circular por la parte central del albardón para evitar la erosión de las márgenes. En la medida que los albardones se van colmatando de sedimentos, se continúan levantando periódicamente hasta la recuperación del nivel original (Figura 6.29). En cuanto a la estabilización de las estructuras se deben seguir los lineamientos expuestos en el suavizado y albardonado de la cabecera, práctica de la cual ésta es complementaria y posterior en el tiempo.

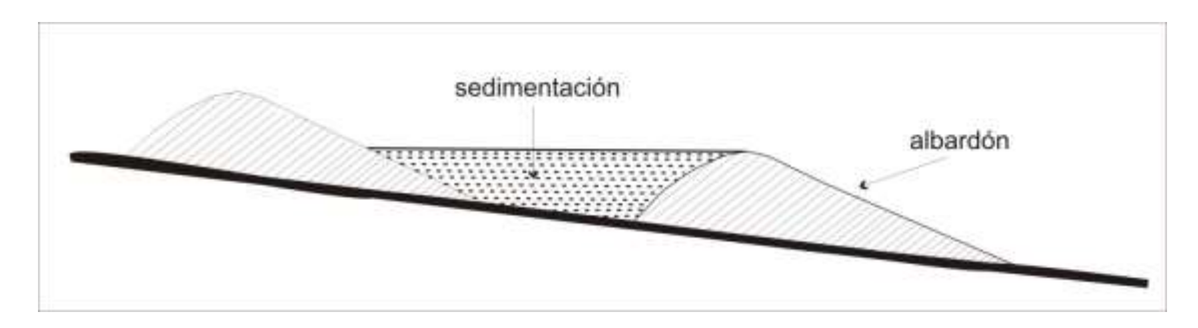


Figura 6.29: Elevación del nivel de base de la cárcava a través del albardonado interno.

Rastrillos de retención

Son estructuras transversales construidas con postes, ramas, estacas, alambre o cualquier otro elemento disponible que permita formar un cerco en el interior de la cárcava. En este caso la acumulación de residuos que lleva el agua, produce el taponamiento de la estructura y la sedimentación. Se pueden utilizar en cárcavas que no permitan el parabolizado de sus márgenes, como es el caso de las cárcavas muy profundas. El distanciamiento entre los rastrillos sigue los mismos criterios que el

albardonado, aunque en este caso podrá ser menor. La disposición de los postes deberá ser aproximadamente parabólica para permitir el paso del agua por el centro de la estructura (Figura 6.30). Por ser una técnica basada en principios de bioingeniería, otros detalles se discuten en el Capítulo 7.

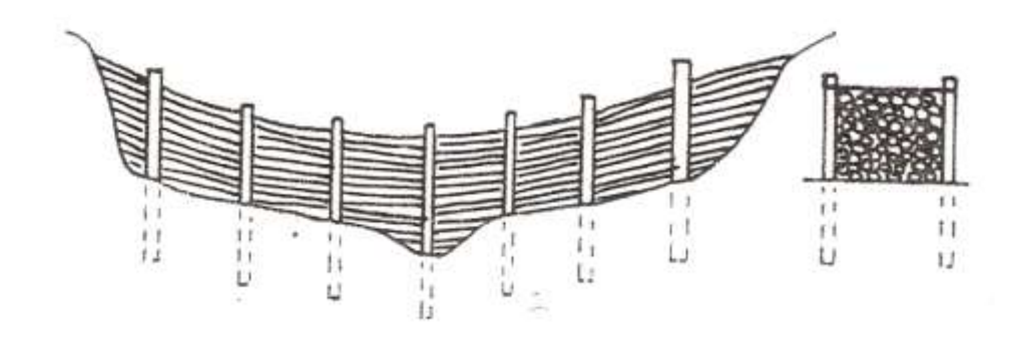


Figura 6.30: Rastrillos de retención para recuperación del piso de cárcava.

Parabolizado o ataludado de toda la cárcava

Consiste en la modificación del perfil de la cárcava mediante el borrado de sus aristas vivas y la posterior parabolización total. Luego se procede al albardonado de la nueva sección parabólica, siguiendo los mismos criterios anteriores. Es aconsejable para cárcavas relativamente pequeñas que permitan el parabolizado de sus márgenes, permitiendo el ingreso a ellas de las maquinarias.

La diferencia con la práctica del albardonado es que aquí se trabaja sobre toda la extensión de la cárcava, mientras que en la anterior sólo se lo hace en el lugar donde van los albardones.

La disposición de los albardones permite obtener una sección de flujo adecuada a los caudales a desaguar, según se esquematiza en la Figura 6.31. En la Figura 6.32 se muestran ejemplos de cárcavas parabolizadas y albardonadas.

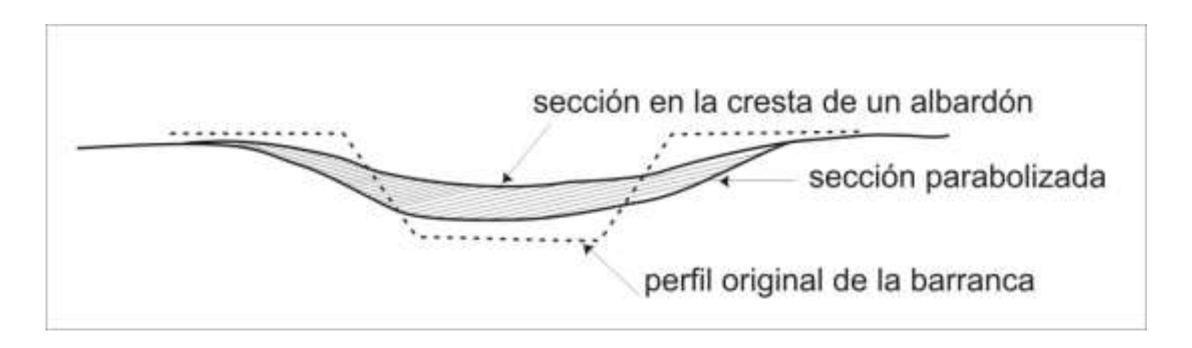


Figura 6.31: Parabolizado de cárcavas.


Detalle sector de cabecera, sobre el fondo albardones transversales.


Etapa inicial del parabolizado de cárcava.

Figura 6.32: Cárcavas parabolizadas y albardonadas (UNRC-SECYOT).

Praderización y forestación de las cárcavas

Estas prácticas son aplicables a cualquier movimiento de suelo que se realiza sobre las cárcavas, y son prácticas imprescindibles para la estabilización del piso y de las estructuras ya vistas.

La praderización debe considerar las condiciones de piso para la elección de especies adaptadas; debe recordarse que la mayoría de los pisos de cárcava son horizontes cálcicos, con todas las limitaciones que ello implica (estructura, pH, disponibilidad de nutrientes, etc.); puede estar asentada sobre tosca o en condiciones de anegamiento (cuando el nivel de base llega a la napa).

Según el tipo de reproducción del vegetal se podrá plantar o sembrar; en caso de sembrarse se deberá utilizar una densidad 3 a 4 veces mayor que la normal para la especie. Se justificará en estos casos la fertilización (N y P) para mejorar el comportamiento del pasto. Según la época en la que finalicen los movimientos de tierra, en relación a la estación de lluvias se elegirán especies anuales de rápido crecimiento (moha, mijo, gramilla, etc. para la primavera) o bien las especies perennes definitivas (alfalfa, agropiro, festuca, tréboles, etc. para el otoño).

La forestación conviene realizarla con estacas o bien mediante plantación con pan de tierra. La disposición de las plantas debe tender a proteger básicamente las paredes laterales de la cárcava, para lo cual se deben disponer en 2 ó 3 hileras paralelas. Detalles de técnicas de plantación y estabilización mediante especies forestales, así como también un detalle de las especies nativas y exóticas posibles de utilizar para las condiciones del centro argentino se encuentran en el Capítulo 7.

6.4. Técnica de control de caudales máximos: Reguladores de escurrimiento.

6.4.1. Características generales

Los reguladores de escurrimiento, también conocidos como microembalses, son pequeñas obras hidráulicas de tierra ubicadas transversalmente a las vías naturales de escurrimiento, consistentes en un murallón de tierra, una salida o descarga principal, un área de embalse y una salida o vertedero de emergencia (Figura 6.33). Su función en la cuenca es la de disminuir los caudales máximos, es decir producir la laminación del hidrograma de escurrimiento aguas abajo de la estructura de regulación. Los embalses discutidos en este apartado son adecuados para cuencas agrícolas, en llanuras, y para cauces no permanentes, y su altura máxima no supera los 5 m. No obstante los procedimientos de cálculo son aplicados a cualquier tipo de embalse.

Figura 6.33: Regulador de escurrimiento: Esquema de componentes principales**.**

Esta práctica es una variante de los denominados embalses agrícolas (ponds), los cuales pueden cumplir variadas funciones en el ordenamiento de las cuencas. Entre ellas se destacan:

- Función de regulación de crecientes: Son embalses diseñados con el vertedero principal ubicado en la base del embalse, a nivel de piso, y su función es solamente de regulación debido a ese detalle constructivo. No retienen escurrimiento ya que todo lo que ingresa, descarga por el vertedero, por lo que el tiempo de embalse dura unas pocas horas, al cabo de las cuales la obra se vacía. Se esquematiza en las Figura 6.33 y Figura 6.34.a.

- Función de retención hídrica: Son embalses con fines exclusivamente de acumulación o retención de agua, ya sea para fines de riego (como el caso de las represas arroceras), o para bebida del ganado (Figura 6.34.b.). Sólo poseen un vertedero lateral de emergencia, por esa razón el embalse permanece siempre con una cierta cantidad de agua. Por no poseer vertedero principal no tiene funciones de regulación, o éstas son mínimas y operan sólo cuando el embalse está vacío (p.e. durante un período extenso de sequía que evapora el agua almacenada).

- Función de retención y regulación: Son los denominados embalses multipropósito (Figura 6.34.c y d), en los cuales el vertedero principal está ubicado a una cierta altura del nivel mínimo de piso, definiendo una altura de embalse, por debajo de la cual cumple funciones de retención. Por encima de la cota de ubicación del vertedero principal, el embalse cumple funciones de regulación. Los embalses construidos en las cuencas pedemontanas de la Provincia de Córdoba son de este tipo.



a. Regulador de escurrimiento, con vertedero principal en la base (Cuatro Vientos, Dpto. Rio Cuarto, Córdoba).



b. Embalse de retención.



c. Embalse multipropósito (San Bartolomé, Dpto. Rio Cuarto, Córdoba)



d. Embalse multipropósito.

Figura 6.34: Diferentes tipos de embalses agrícolas.

Para embalses de regulación, en cuencas de llanuras agrícolas onduladas, y cuencas de flujo no permanente, la eficiencia de la obra dependerá de los siguientes aspectos:

- Tamaño de la cuenca: en cuencas demasiado pequeñas (menor de 50 ha) o demasiado grandes (mayores de 1000 ha), la eficiencia disminuye, ya sea porque aportan poco caudal o porque el volumen escurrido es demasiado, en relación con la capacidad de embalse;

- Volumen de embalse: cuanto mayor sea la capacidad de embalse (en función de la topografía) para un volumen de escurrimiento dado, habrá mayores posibilidades de disminuir los caudales pico. Las condiciones topográficas ideales para localización de embalses son aquellas con una baja pendiente en el sentido longitudinal del cauce, y con mayor pendiente en el sentido transversal al cauce. De este modo se logra mayor volumen embalsado con menor movimiento de suelo para el terraplén.

- Relación volumen escurrido / caudal pico: cuanto menor sea la relación, es decir cuanto menor sea el volumen escurrido para un mismo caudal pico, mayores posibilidades de regulación.

La selección de subcuencas en las cuales se ubicarán este tipo de obras requiere analizar los siguientes aspectos:

- Caudal que la subcuenca aporta al curso permanente;
- Tiempo de concentración de las diferentes subcuencas;
- Procesos de erosión lineal en subcuencas (asociado al control de cárcavas);
- Características topográficas de las subcuencas que permitan optimizar la eficiencia del microembalse.

Este tipo de obras además, puede estar asociada a defensas de cabeceras de cárcavas (Figura 6.32.a), ya que permite disminuir los riesgos de destrucción y los costos de la obra de defensa.

El planteo de la ubicación de las obras, requiere la visión regional de la cuenca y subcuenca, e implicará la selección de áreas prioritarias, las que se destinarán a un uso pecuario no permanente, como son las áreas de embalse y periféricas que funcionan como trampas de sedimentos.

Otros detalles constructivos de este tipo de obras pueden encontrarse en Koolhaas (2003) y en el Agricultura Handbook 590 (USDA, 1997).

6.4.2. Dimensionamiento de pequeños embalses reguladores

Se describe a continuación el procedimiento de cálculo del tránsito de crecientes (flood-routing) para un embalse regulador (Chow *et al*., 1993; Fangmeier *et al*., 2006). Tres procesos ocurren simultáneamente durante una creciente que llega a un embalse: a) la llegada de la creciente, b) la acumulación de agua en la represa y c) la salida por el vertedero principal. El procedimiento de tránsito de crecientes resuelve la ecuación de conservación de la masa considerando estos tres procesos simultáneos.

En la Figura 6.35 se muestran los cuatro componentes básicos del cálculo de reguladores, tomada de una pantalla del programa HEC-HMS (Capítulo 2): hidrograma de entrada, hidrograma de salida, altura del agua en el embalse y volumen almacenado. Se puede ver que el caudal pico de la cuenca es del orden de 25 m^3/s, que el embalse redujo el caudal de salida a aproximadamente 3 m^3/s (es decir redujo el caudal en un 88 %), que la altura máxima que alcanzó el agua en el embalse fue de aproximadamente 3,6 m y se acumularon alrededor de 950.000 m^3 en el pico máximo.

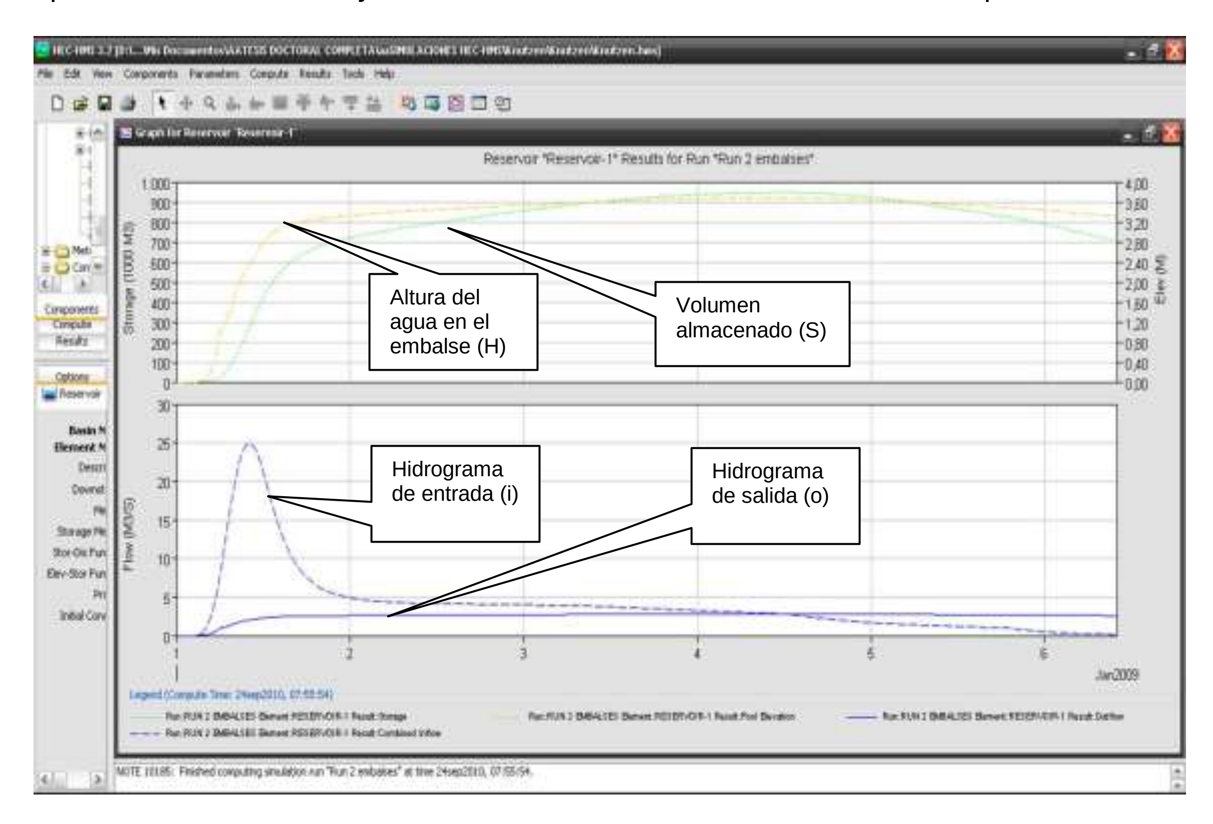


Figura 6.35: Componentes de cálculo de microembalse regulador, obtenidos mediante HEC-HMS.

Por lo tanto el procedimiento de cálculo siguiente tiene como objetivo determinar:

- Altura máxima del agua en el embalse o represa;
- Volumen de almacenaje correspondiente a esa altura;
- Hidrograma de salida (o descarga) para un determinado hidrograma de entrada.

A continuación se describe el procedimiento de cálculo manual de tránsito de crecientes para su comprensión paso a paso.

La expresión que permite visualizar la entrada de agua al embalse (i), la descarga o salida (o) y el almacenaje (S), como una función del tiempo, es la ecuación de continuidad o conservación de la masa para flujo variable, y se expresa como:

$$i \times dt = o \times dt + S \times dt$$

donde:

i = input, caudal de entrada para un pequeño intervalo de tiempo;
o = output, caudal de salida para un pequeño intervalo de tiempo;

S = variación del almacenaje para un pequeño intervalo de tiempo (por su sigla en inglés storage);
dt = intervalo de tiempo.

La ecuación anterior también puede escribirse en forma de paso discreto de tiempo para un intervalo Δt:

$$\Delta t \times \frac{i_1 + i_2}{2} = \Delta t \times \frac{o_1 + o_2}{2} + S_1 \times S_2$$

donde i_1, o_1 y S_1 e i_2, o_2 y S_2 son las magnitudes de los procesos de entrada, salida y almacenaje al comienzo y al final del intervalo Δt, respectivamente.

El principio general del método es la división del hidrograma de entrada en intervalos de tiempo de corta duración, de modo que en cada uno de ellos, los caudales de entrada y salida pueden considerase constantes.

La información necesaria para el cálculo de crecientes en un regulador son los siguientes:

1. Hidrograma de entrada a la represa (i);
2. Relación entre altura del agua embalsada (H) y la salida (o) por el vertedero principal ;
3. Variación del almacenaje con la altura del agua embalsada (relación S y H);
4. Hidrograma de salida o descarga (o).

Finalmente con esta información se encuentra uno de los principales diseños de un embalse: la altura que alcanzará el agua para una determinada creciente de diseño. Por encima de esa altura se construye el vertedero de emergencia, y la altura de seguridad del embalse. De este modo el vertedero lateral o de emergencia es el encargado de dar seguridad a la obra, ya que descargará toda creciente superior a la de diseño.
A continuación se detallan los procedimientos de cálculo manual de un regulador de escurrimiento.

Obtención del hidrograma de entrada

El hidrograma de entrada, o de diseño, es el hidrograma de la cuenca para un evento extremo y para un determinado período de recurrencia. Para este tipo de obras, de alto costo y potencial peligro de daños de producirse un colapso, se toman períodos de recurrencia altos, entre 50 a 100 años. Si no se poseen datos de medición del escurrimiento (aforos) en el lugar, debe recurrirse a modelos empíricos que permitan obtener la forma del hidrograma, tal como los discutidos en el Capítulo 2.

Para transformar datos de caudal pico, a un hidrograma completo, existen métodos, como el del hidrograma adimensional del SCS (Fangmeier *et al.*, 2006) que permite una aproximación y solo requiere los datos de caudal pico y de volumen total de escurrimiento de la cuenca. La forma típica del hidrograma adimensional se muestra en la Figura 6.36; está graficado en unidades adimensionales de caudal y en unidades adimensionales de tiempo.

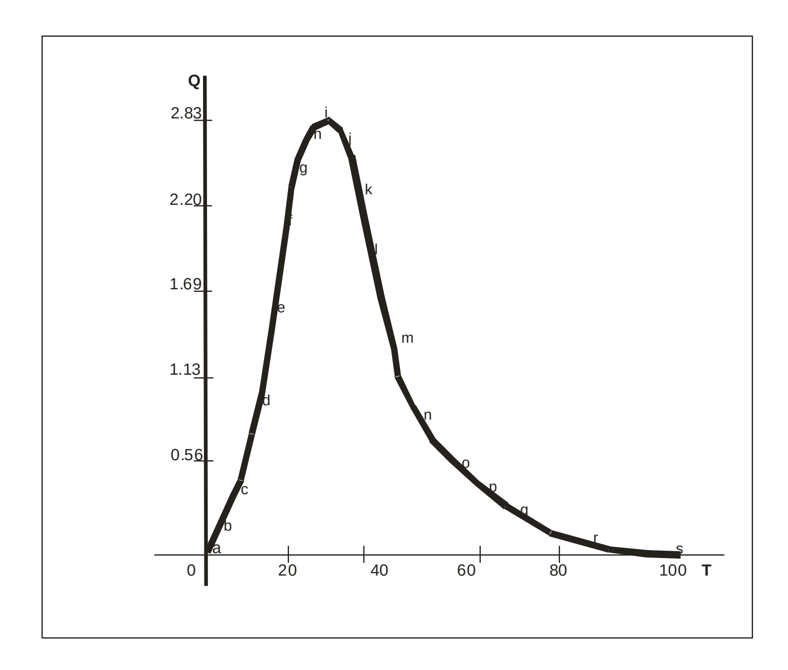


Figura 6.36: Hidrograma adimensional del SCS.

Al ser un hidrograma adimensional, se debe encontrar factores de corrección que permita transformarlo en unidades reales para la cuenca de interés. Esos factores se obtienen mediante los datos de caudal pico y volumen de escurrimiento de la cuenca, y se los denomina u, w y k.

El valor u es la relación entre el volumen total de escurrimiento y el área bajo el hidrograma básico:

$$u = \frac{Ve}{470}$$

donde:

Ve= volumen de escurrimiento de la cuenca en ha*m, obtenido por algún procedimiento (Capítulo 2) 470= número de unidades de área bajo el hidrograma básico adimensional.

El factor w es la relación entre el caudal máximo de la cuenca y el caudal máximo en el hidrograma adimensional:

$$w = \frac{Q}{2.83}$$

donde:

Q= caudal pico de la cuenca m^3/s, obtenido por algún procedimiento (Capítulo 2);

2,83= valor de caudal pico en el hidrograma adimensional en unidades arbitrarias.

El factor restante, k, es el que vincula la dimensión de tiempo para poder construir el hidrograma de diseño de la estructura y surge de la relación entre las dos anteriores:

$$k = \frac{u}{w} \times 726$$

donde: 726 es un factor de conversión al sistema métrico, estando k en minutos.

En la Tabla 6.3 se detallan los valores de ordenadas y abscisas del hidrograma básico en unidades operables en el sistema métrico.

Tabla 6.3: Ordenadas y abscisas de la Figura 6.35 para obtención del hidrograma estimado de la cuenca.

Punto	t	Q
a	0	0,00
b	3	0,14
c	7	0,42
d	10	0,99
e	13	1,58
f	16	2,18
g	18	2,55
h	20	2,75
i	23	2,83
j	27	2,72
k	30	2,41
l	34	2,01
ll	40	1,42
m	47	0,93
n	53	0,68
o	60	0,45
p	67	0,13
q	84	0,11
r	100	0,00

Mediante este cuadro y los valores de w y k se puede construir el hidrograma de diseño, simplemente mediante el producto del valor de t * k y de cada valor de w * Q. Dichos valores se expresaran en un cuadro de tres columnas; similiar a la Tabla 6.4.

Tabla 6.4. Hidrograma de entrada o de diseño derivado del hidrograma adimensional del SCS.

punto	k.t	w.Q
a		
b		
c		
.		
.		
n		

Los valores obtenidos en esta tabla dan el hidrograma de entrada o de diseño, necesario para la resolución gráfica del tránsito de la creciente.

Relación entre altura del agua embalsada (H) y la salida (o) del vertedero principal

Esta relación entre la altura que va tomando el agua a medida que se llena el embalse (carga hidráulica H) y la descarga a través del vertedero de salida o vertedero de fondo, permite establecer cual será el caudal regulado, y por lo tanto la capacidad amortiguadora de crecientes de la obra. La determinación de la capacidad de regulación optima es un compromiso entre la altura a dotar al embalse y la capacidad del vertedero de descarga, ya que, cuanto más altura tenga el embalse (mayor

capacidad de almacenaje), menor puede ser la salida por el vertedero (representada por la superficie de tubos de descarga). La base de estimación es la teoría de la descarga por un orificio, o en este caso, por un flujo bajo alcantarilla (Koolhaas, 2003). Esta relación está expresada en el principio de Torricelli que dice que la salida por un tubo a presión, está dada por la siguiente expresión:

$$Q = a \times C \times \sqrt{2 \times g \times h}$$

donde:

Q =caudal de descarga por la salida, en m^3/s;
a=sección de la salida, en m^2;
C= coeficiente de descarga que depende de las características del conducto;
g=aceleración de la gravedad (9,81 $m/seg^{2)}$;
h = diferencia de altura entre aguas arriba y aguas debajo de represa.

Nótese que H no es exactamente igual a h, la primera es la altura total del agua almacenada, y la segunda es la diferencia de altura entre aguas arriba y aguas abajo. La altura h suele tomarse desde el pelo de agua en la represa a la mitad de la altura del orificio de salida.

Con la información obtenida se construye una curva de altura versus descarga, tomando un rango de alturas mayor al que se estima podrá tener la represa (3-4 m), ya que es una información que, una vez integrada a los otros procesos, nos dará la altura máxima de agua en la represa. Para microembalses con salida tipo alcantarilla con tubos de hormigón (C = 0,6) de 0,8 m de diámetro, y diferente número de tubos, se dan valores aproximados de caudal de salida en la Figura 6.37 (Cisneros, 2010).

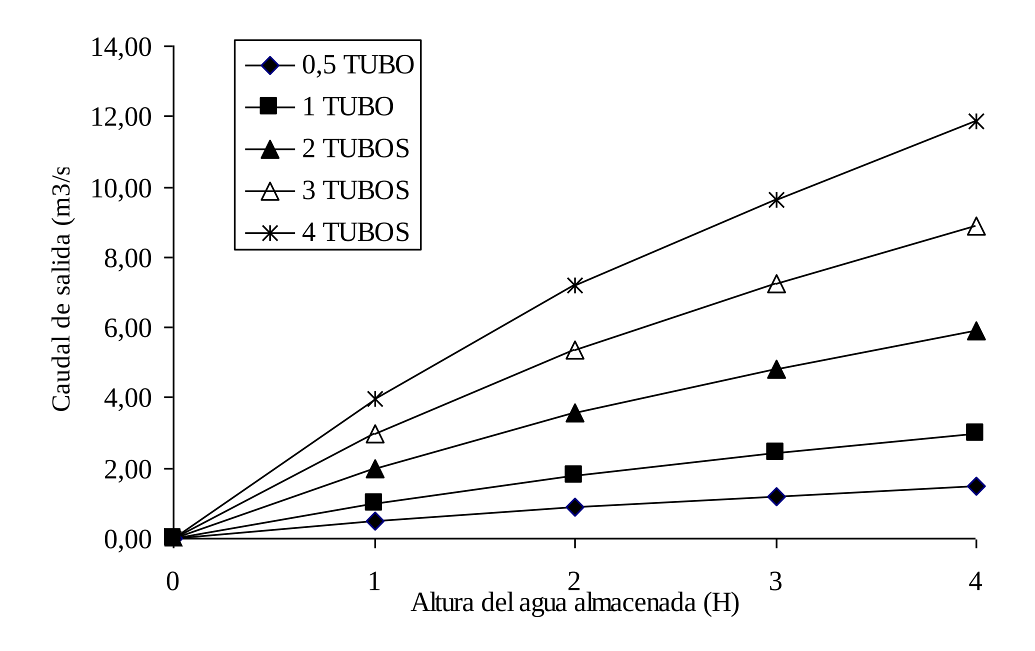


Figura 6.37: Caudales de salida en función de la altura del agua en el embalse, para diferente número de tubos de alcantarilla de 0,8 m de diámetro.

Relación altura de pelo de agua-almacenaje en la represa

La capacidad de almacenaje de una represa es función de las características del relieve aguas arriba de la misma y de su altura. Para conocer la relación altura-almacenaje (H-S), se deberá hacer el relevamiento planialtimétrico de la zona de embalse, con la definición precisa de las curvas de nivel. Para encontrar los volúmenes almacenados correspondientes a las diferentes alturas (curvas de nivel), se utilizará el método del área final. El método consiste en seccionar el volumen total embalsado en capas correspondientes a dos curvas de nivel consecutivas, de este modo se obtienen "tajadas" de un volumen aproximadamente igual a la media de las áreas de dos curvas de nivel consecutivas, multiplicadas por el desnivel entre ambas curvas.

El procedimiento de cálculo del volumen almacenado para cada altura del embalse, se discute en el siguiente ejemplo. En la Figura 6.38 se muestra el plano de curvas de nivel del área de embalse, las cuales tienen una separación de 0,25 m entre ellas.

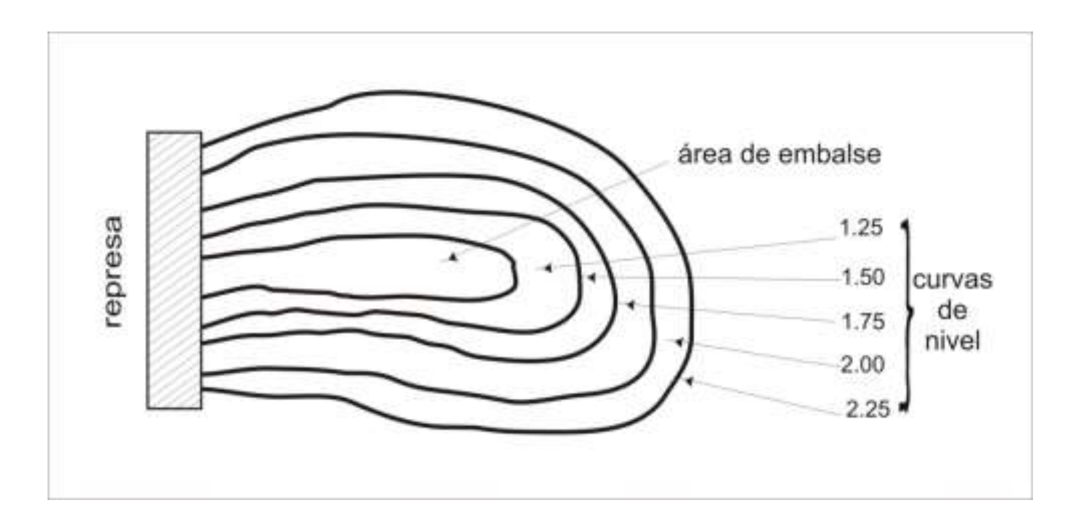


Figura 6.38: Planialtimetría del área del embalse.

De esta planialtimetría se estiman las superficies comprendidas dentro de las curvas de nivel hasta su encuentro con la represa. En la Tabla 6.5 se muestra un ejemplo de planialtimetría de un área de embalse.

Tabla 6.5: Area media entre curvas y total de la planialtimetría de la Figura 6.37.

Curva de nivel (m)	**Área total (ha)**	**Área media entre curvas (ha)**
2,25	30,81	27,62
2,00	24,54	21,07
1,75	17,61	15,21
1,50	12,81	11,00
1,25	9,19	8,11
1,00	7,04	5,68
0,75	4,32	3,44
0,50	2,56	1,68
0,25	0,80	0,40
0,00	0,00	0,00
		$\sum$=94,26 ha

En este ejemplo,

el volumen máximo de embalse (a 2,25 m) será igual a la sumatoria de todas las áreas medias, multiplicadas por el intervalo entre curvas de nivel (0,25 m), así:

$$V(2.25\ m) = 94.26\ ha \times 0.25\ m = 23.56\ ha \times m$$

Nótese que la unidad ha x m es una unidad de volumen (equivalente a 10.000 m^3), de utilidad sólo para el procedimiento de cálculo. El siguiente volumen de embalse será la diferencia entre el volumen anterior y el correspondiente al descenso en 0,25 m del pelo de agua. Así:

$$V(2\ m) = V(2.25\ m) - 27.62\ ha \times 0.25\ m = 16.64\ ha \times m$$

Los valores así obtenidos se grafican conjuntamente con los valores de altura-descarga; para ello deben transformarse de ha * m a m^3/seg* hora (que también es una unidad de volumen), mediante la siguiente relación:

$$10000\ m^2 \times m \times \frac{1hora}{3600\ seg} = 2.78\ \frac{m^3}{seg} \times hora$$

De esta manera, en la Figura 6.39 quedan representados los dos procesos, en unidades coherentes; a la derecha los valores de almacenaje y a la izquierda los de descarga, cuidando que los valores máximos de ambas magnitudes queden a la misma altura.

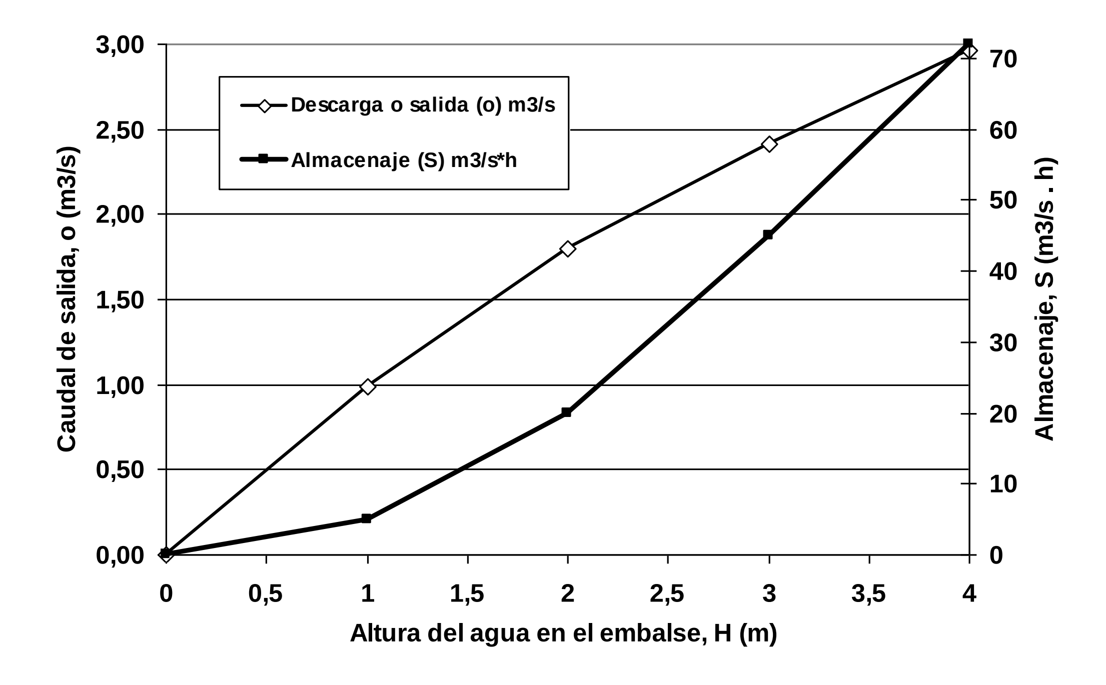


Figura 6.39: Relación altura del agua (H) – almacenaje de la represa (S), y caudal de salida (o).

Como puede observarse en la Figura 6.38. se han integrado gráficamente tres de los cuatro procesos que deben ser calculados en el tránsito de crecientes: salida (o), almacenamiento (S) y altura del agua en la represa (H), en unidades consistentes. Con esta información se está en condiciones de hacer los cálculos integrados, para obtener el hidrograma de salida.

Obtención del hidrograma de salida

El método de cálculo propuesto significa un procedimiento matemático basado en leyes de la física (ecuación de continuidad), pero en condiciones reales, la solución es un proceso de prueba y error, cuya solución óptima involucra aspectos técnico-económicos. Estos aspectos se refieren esencialmente a lo siguiente:

- Relación entre el costo de la represa de tierra con su estructura de salida y el costo de la estructura a construir aguas abajo (por ejemplo el control de una cabecera de cárcava); deben involucrarse aquí además los costos y beneficios sociales (por ejemplo en la protección de una población afectada por inundaciones).

- Relación entre el costo de movimiento de tierra y el de la estructura de salida (alcantarilla, caños, etc.). Cuanto más alta sea la represa, menor dimensión tendrá la estructura de salida, en otras palabras cuanto mayor capacidad de embalse tenga la represa, menor deberá ser la salida o descarga controlada.

- Vertedero de salida de emergencia: otro elemento componente de la estructura reguladora es el vertedero de seguridad. Se encuentra ubicado en uno de los extremos del embalse y permite la evacuación de crecidas extraordinarias que sobrepasen la altura máxima calculada. Su capacidad de evacuación puede ser o no tomada en cuenta para los cálculos del hidrograma de salida; en caso de considerarse, se deberán agregar a la tabla de altura, descarga a partir de la altura a la que comience a funcionar ese vertedero adicional. La descarga total será la sumatoria del caudal de salida por la estructura reguladora y el caudal de salida por el vertedero de emergencia.

El procedimiento para la obtención del hidrograma de salida involucra la solución de la ecuación de continuidad para el intervalo Δt ya discutida:

$$\Delta t \times \frac{i_1 + i_2}{2} = \Delta t \times \frac{o_1 + o_2}{2} + S_1 \times S_2$$

En esta forma la ecuación no permite hallar una solución por el método gráfico, por lo tanto para poder usarla se debe transformar dicha ecuación a la siguiente forma:

$$\frac{S_2}{\Delta t} + \frac{o_2}{2} = \frac{i_1 + i_2}{2} + \frac{S_1}{\Delta t} + \frac{o_2}{2} - o_1$$

El valor Δt se tomará como un 15 % del tiempo al pico del hidrograma, es decir:

$$\Delta t = 0.15 \times Tp$$

Para resolver la ecuación se deben elaborar dos planillas de trabajo, de modo de ir completándolas por un procedimiento gráfico. La primera planilla se muestra en la Tabla 6.6:

Tabla 6.6.: Planilla de trabajo para la resolución de la ecuación de continuidad en tránsito de crecientes.

Descarga (o) m^3/seg	Almacenaje (S) m^3/seg . hora	S/Δt	o/2	S/Δt + o/2

Las primeras dos columnas se obtienen gráficamente a través de la selección de pares de puntos de la Figura 6.38, ingresando por los valores de descarga hasta cortar la curva de almacenaje y de allí salir hacia el eje opuesto. De este modo obtenemos la serie de valores S y o necesarios para la Tabla 6.5. El procedimiento se muestra en el esquema de la Figura 6.40.

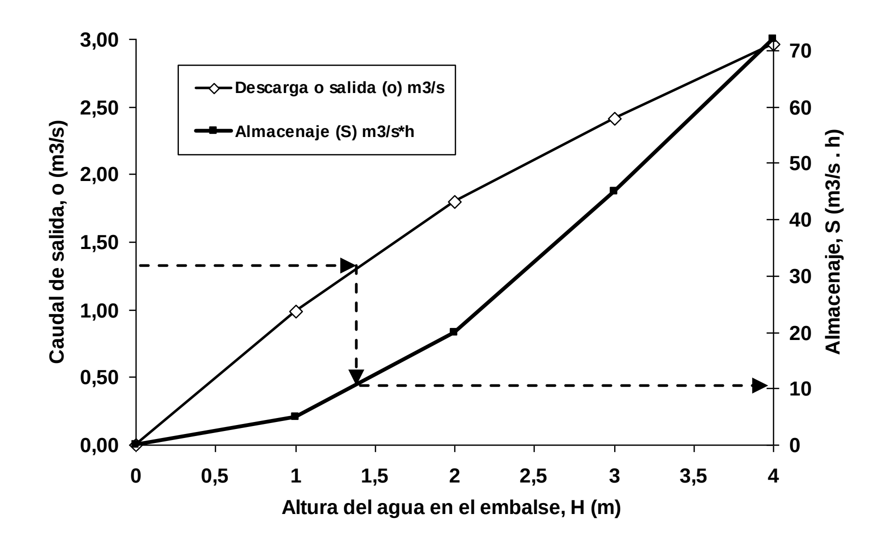


Figura 6.40:Procedimiento gráfico para la obtención de los datos de almacenaje a partir de los datos de descarga de la represa.

Los valores de la tabla se obtienen operando matemáticamente. La resultante operativa de esta planilla debe ser una nueva figura auxiliar en papel doble logaritmo de valores de (o) vs. ($S/\Delta t$ + o/2), que ayudará a encontrar, mediante un último procedimiento analítico y gráfico, el hidrograma de salida (Figura 6.41).

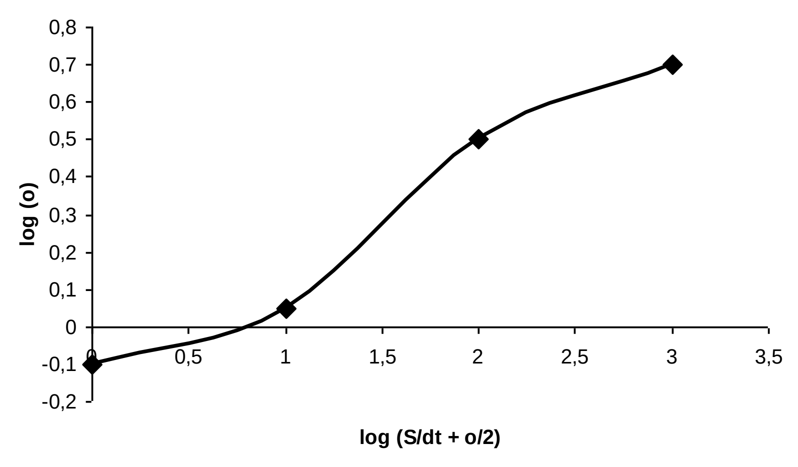


Figura 6.41: Gráfico auxiliar para la obtención del hidrograma de salida.

Para desarrollar el hidrograma de salida (o), se confecciona una segunda planilla de trabajo, representada en la Tabla 6.6 sobre la cual se desarrollará el procedimiento analítico y gráfico que genera el hidrograma de salida. En esta planilla se encuentran integrados todos los procesos en el tiempo.

Para completar la Tabla 6.6 se requiere la interpolación de valores de tiempo y caudal desde el hidrograma de entrada (Tabla 6.3), para los sucesivos Δt elegidos. De

este modo pueden completarse las columnas (1) y (2) de la Tabla auxiliar 6.7. La columna (3) es el promedio de los valores de i consecutivos.

Tabla 6.7: Tabla auxiliar para la obtención del hidrograma de salida (o), a partir del hidrograma de entrada (i) y el almacenamiento (S).

(1) Tiempo Δt	(2) entrada i	(3) $(i_1+i_2)/2$	(4) $S/\Delta t + o/2$	(5) salida o

Las columnas (4) y (5) se van obteniendo mediante la siguiente ecuación e interpolando puntos de la Figura 6.40, de la forma en que se explica a continuación:

$$\left(\frac{S_2}{\Delta t} + \frac{o_2}{2}\right) = \left(\frac{i_1 + i_2}{2}\right) + \left(\frac{S_1}{\Delta t} + \frac{o_2}{2}\right) - o_1$$

a b c d

Se observa que las columnas (3), (4) y (5), corresponden a los términos b, c y d de la ecuación, por lo tanto b + c - d = a , siendo a el siguiente valor de la columna (4), con ese nuevo valor obtenido se va al gráfico log-log de Figura 6.40, y se sale con un nuevo valor de (o). De esta manera haciendo las correspondientes operaciones matemáticas y gráficas se van completando las columnas.

Una vez completada la planilla anterior se obtiene un valor de caudal de salida (o) máximo, que será menor que el pico de entrada y estará desplazado en el tiempo. Ese valor de salida máximo se corresponderá con el máximo almacenaje de la represa. Con ese valor de almacenaje máximo (Smax), sólo resta encontrar con qué altura del agua (H) se corresponde, esto a partir del gráfico de altura almacenaje de la Figura 6.42. Para este ejemplo, la altura máxima del agua alcanza una cota de aproximadamente 2.1 m, con un almacenaje máximo de 23 m^3/s h.

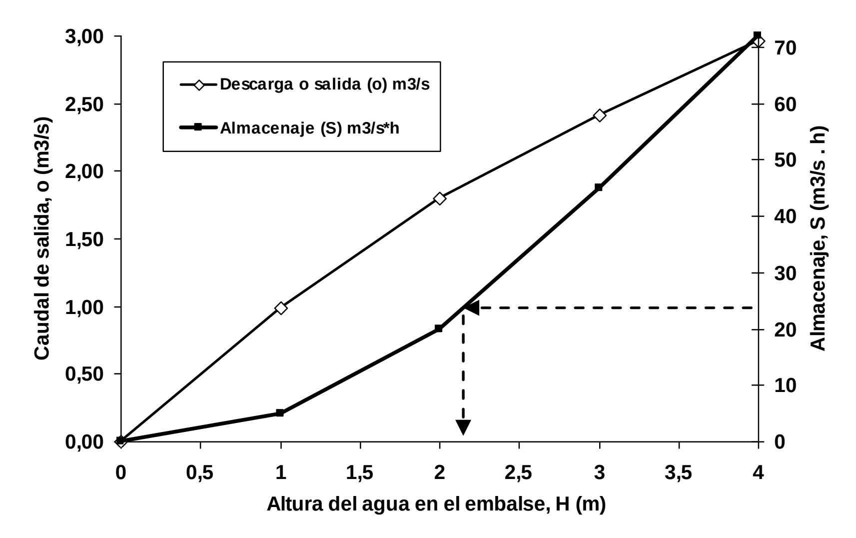


Figura 6.41: Procedimiento gráfico para obtener la altura máxima del agua en el embalse.

Esta altura máxima de almacenaje obtenida va a ser la cota a la que deberá ubicarse el vertedero de emergencia en la obra. La altura total del embalse (H_T) estará compuesta por:

-altura del máximo almacenaje (H_{max});

-altura estimada del pelo de agua en el vertedero de emergencia para tormentas extraordinarias; oscila entre 0,3 - 0,4 m (H_{emerg}),

-borde libre por sobre el máximo pelo de agua previsto para el vertedero de emergencia; podrá estar entre 0,5 y 1,0 m (H_b).

De este modo la altura total del embalse será (Figura 6.43):

$$H_T = H_{máx} + H_{emerg} + H_b$$

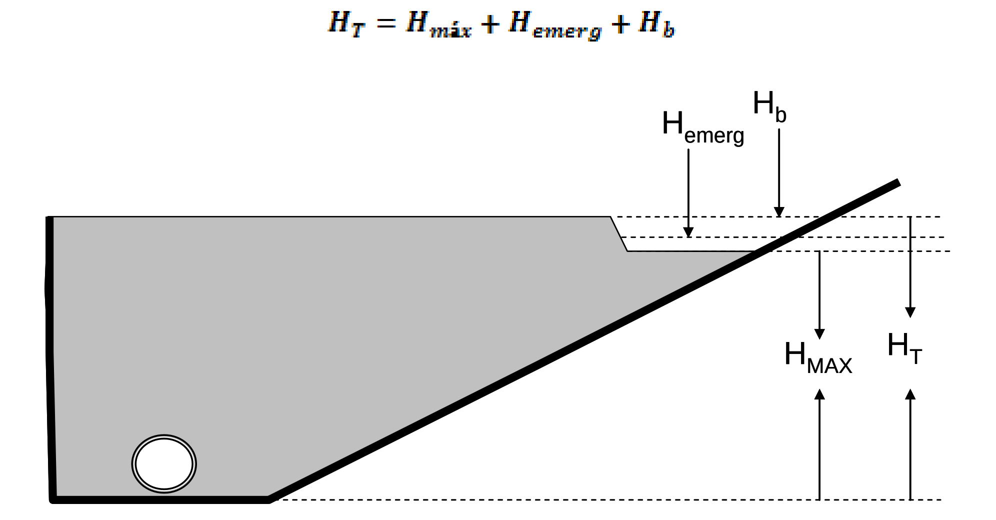


Figura 6.43: Componentes de la altura total embalse.

Para las dimensiones transversales del terraplén, se pueden tomar los siguientes valores:

Ancho en la base = 0,2 H_{MAX} + 3 (m)
Relación de taludes:

aguas arriba = 1 : 1
aguas abajo = 2 : 1

Es importante el grado de compactación que tenga el centro del murallón, se puede lograr por el paso de maquinarias a medida que se va colocando la tierra, preferiblemente en condiciones húmedas o mojadas o con el uso de arcillas especiales con capacidad de impermeabilización.

En el Capítulo 2 se detallan los componentes de cálculo de reguladores de escurrimiento utilizados en el programa HEC-HMS, el que permite automatizar la rutina de cálculo explicada en este apartado. Para ello se utilizan los comandos de datos apareados (paired data manager), en los cuales se cargan las relaciones altura-almacenaje, altura-descarga y descarga-almacenaje.

Bibliografía

Cisneros, J.M. 2010. Bases para el ordenamiento territorial del sur de Córdoba (Argentina). El caso de la Cuenca de los Arroyos Menores. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Madrid. Inédito.

Chow, V.T.; Maidment D. y L.W. Mays. 1993. Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill, 584 pp.

Fangmeier, D.D.; Elliot, W.J.; Workman, S.R.; Huffman, R.L. y G.O. Schwab. 2006. Soil and Water Conservation Engineering. 5ª Edición, Thomson Delmar Learning, 502 pp.

Koolhaas, M. 2003. Embalses agrícolas. Diseño y construcción. Editorial Hemisferio Sur. 336 pp.

Luque, E.L. 1997. Prácticas estructurales. En: Sereno, R. (Coord.) Manual de control de la erosión hídrica. Universidad Nacional de Córdoba.

Morgan R.P.C. y R.J. Rickson, 1995. Slope Stabilization and Erosion Control- A Bioengineering Approach. E & FN SPON. Inglaterra, 274 pp.

USDA. 1997. Ponds. Planning, design, construction. Agricultural Handbook 590.

Capítulo 7: Control de erosión en áreas críticas. Técnicas de bioingeniería.

7.1. Introducción

Se entiende por bioingeniería al uso de la vegetación para la estabilización de laderas, riberas de cursos de agua y el control de erosión hídrica y eólica en áreas críticas. Bioingeniería e ingeniería biotécnica son los términos hallados en la bibliografía. Conceptualmente se utiliza el término **bioingeniería** para referirse a aquellas técnicas que usan cualquier forma de vegetación, ya sea una simple planta o una colección de ellas como material de ingeniería (es decir aquel material que tiene características y comportamientos cuantificables). **Ingeniería biotécnica** se refiere a aquellas técnicas en las cuales la vegetación se combina con estructuras inertes, tales como muros de piedra o gaviones, de modo de combinar los beneficios estructurales de los componentes vegetativos y no vegetativos (Morgan y Rickson, 1995). En esta obra se utilizará el término bioingeniería para hacer referencia a ambos conceptos indistintamente.

El uso de ambos tipos de técnicas requiere una aproximación multidisciplinaria que integre conocimientos de ecología, botánica, clima, suelos, geotécnia, hidrogeología, física, mecánica de los materiales e ingeniería civil. El conocimiento ecológico y botánica permite determinar cuales serán las especies mejor adaptadas para cada tipo de ambiente a intervenir; el conocimiento del material de suelo y sus características físico-químicas e hidrológicas permite evaluar el comportamiento de diferentes tecnologías de bioingeniería en relación al sustrato a estabilizar, mientras que los conocimientos sobre materiales y su mecánica, hidráulica de cursos y la estabilización de laderas cierran la integración disciplinaria necesaria para diseñar y aplicar las técnicas.

La región central argentina se caracteriza por presentar condiciones de relieve, suelos y clima que predisponen a la degradación de los suelos por erosión hídrica y eólica. Los materiales originarios de los suelos se caracterizan por presentar baja estabilidad por falta de cohesión y adhesión, asociados a pendientes fuertes y climas de alta erosividad que determinan fenómenos graves de los diferentes tipos de erosión: laminar, en surcos, cárcavas para tierras agrícolas. Por otra parte las cuencas de áreas serranas definen una profusa red de cursos permanentes que están sometidos a erosión de fondo y márgenes. Otros impactos negativos asociados a las cuencas agrícolas tienen relación con el uso creciente de agroquímicos (fertilizantes y biocidas) y sistemas de producción ganadera concentrados, que pueden incrementar la contaminación por fuente puntual y difusa de las aguas de ríos y arroyos de la región.

Es en este contexto ambiental donde existe la necesidad de incorporar masivamente las técnicas de bioingeniería en los futuros planes de ordenamiento territorial.

Diversas estimaciones han dado cuenta de la magnitud de la aplicación de técnicas de bioingeniería para la región sur de Córdoba. Cantero *et al.* (1998) estimaron en aproximadamente 70.000 ha la superficie con erosión crítica en la zona serrana, para la zona ondulada se requiere la revegetación de más de 600 km de

márgenes de cursos permanentes y el control de alrededor de 250 meandros en los ríos Cuarto y Quinto, el control y recuperación de piso de 600 cabeceras y 2500 ha de cárcavas activas y la recuperación y revegetación de más de 500 médanos activos.

7.2. Condiciones donde se aplican técnicas de bioingeniería.

Las técnicas de bioingeniería se aplican para el para el control de la erosión hídrica y eólica en situaciones donde otras técnicas no garantizan eficiencia y efectividad. Las técnicas se aplican a situaciones como las siguientes:

- Estabilización y control de erosión en laderas en pendiente para construcción de caminos, terraplenes, embalses y desmontes recientes (Figura 7.1).



Terraplén estabilizado con geotextil con césped, arbustos y árboles.



Terraplén estabilizado con arbustos, árboles, materiales bastos y ornamentales.



Terraplén en estabilización con recubrimiento de tejidos, tierra con vegetación



Terraplén ya estabilizado



Estabilización de taludes con geotextiles que llevan incluidos tierra y semillas de vegetación herbácea, (El Chaltén, Santa Cruz, SECYOT-UNRC)

Figura 7.1: Estabilización de terraplenes en áreas urbanas y rutas (Castilla, España. SECYOT – UNRC)

- Estabilización de cabeceras de cuencas de montaña, laderas pronunciadas sujetas a erosión por deslizamiento o remoción en masa (Figura 7.2 y Capítulo 3).




Figura 7.2: Estabilización de cuencas serranas con forestación y de torrenteras con rastrillos de piedras, tierra y vegetación herbácea. (Cantabria, España, SECYOT-UNRC)

- Estabilización y revegetación de márgenes de meandros de ríos y arroyos con erosión de costas. Estas técnicas además permiten reducir la carga de sedimentos y contaminantes transportados por los cursos (Figura 7.3).



Forestación de márgenes arroyo Purmamarca, Jujuy, estabilización de las márgenes ante descargas torrenciales.



Vegetación natural márgenes arroyo “Cueva de las Manos”, Santa Cruz, protección de márgenes y refugio de fauna.



Revegetación márgenes arroyo Ají (Córdoba), con vegetación herbácea y arbustiva.



Forestación de márgenes río Quillén, Neuquén estabilización ribera y control de sedimentos.

Figura 7.3: Ejemplos de estabilización de márgenes de arroyos con vegetación herbácea y arbórea, implantada y espontánea (SECYOT-UNRC).

- Control y captura de sedimentos y contaminantes volcados desde las tierras agrícolas hacia canales y cursos de agua, mediante técnicas de fajas buffer.

- Estabilización de médanos vivos y dunas mediante revegetación herbácea, arbustiva y arbórea (Figura 7.4),




Estabilización de dunas costeras con vegetación herbácea y arbórea (Coronel Rosales (Buenos Aires).




Forestación de medanos con álamos en Laguna Oscura (Córdoba).

Figura 7.4: Estabilización de dunas y médanos (SECYOT – UNRC).

- Control de saltación y rodadura de partículas en superficies sujetas a erosión eólica, producto del fuego, desmonte o rotaciones inadecuadas, mediante fajas de pasto.

- Estabilización de sedimentos inestables como los generados por desbordes de ríos y arroyos, coladas de barro, erosión en masa etc.

- Control de erosión de fondo de cárcavas activas (Figura 7.5).



Meandro con erosión activa, arroyo Mosuc Mayu (Córdoba).



Cárcava en camino rural cuenca Arroyo Chico (Córdoba).



Piso de cárcavas con varias cabeceras activas cuenca La Colacha (Córdoba).



Meandro con erosión activa, río Cuarto en Reducción (Córdoba).

Figura 7.5: Áreas críticas para aplicación de técnicas de bioingeniería (UNRC-SECYOT).

Las técnicas de bioingeniería en estas situaciones permiten soluciones efectivas y sustentables, tanto desde el punto de vista económico como ambiental, ya que son tecnologías dinámicas y de acción creciente por el propio desarrollo del vegetal con el transcurrir del tiempo, están integradas al paisaje por la misma vegetación, permiten una mejora visual del sitio y aseguran su perdurabilidad y estabilidad. No obstante para su aplicación es necesario entender la dinámica de los procesos a estabilizar y las propiedades de la vegetación, en relación a los procesos de estabilización/desestabilización de suelos y laderas sobre las que se actúa.

7.3. Propiedades ingenieriles de la vegetación

Como se analizó en el Capítulo de Erosión (Capítulo 3) la vegetación ejerce su influencia estabilizadora de los materiales del suelo a través de la acción de la porción viva y muerta superficial (tallos, hojas, residuos) como subterránea (raíces, materia orgánica humificada, etc.).

Los efectos de la vegetación son múltiples y pueden resumirse en el conjunto de propiedades que se indican en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Propiedades modificadas por la vegetación utilizadas en las técnicas de bioingeniería (Modificada de Styczen y Morgan, 1995).

Propiedades del suelo		
Hidrológicas	**Hidráulicas**	**Mecánicas**
Evapotranspiración Intercepción Infiltración Escurrimiento Flujo subsuperficial	Rugosidad superficial Velocidad del agua	Resistencia a la tensión Resistencia al corte Cohesión-adhesión Agregación Raíces en cuña Anclaje y arqueo del suelo Sobrepeso

7.3.1. Propiedades hidrológicas

La vegetación influye sobre la hidrología del suelo a través de su efecto en el encostramiento (sellado) superficial, la relación infiltración/escurrimiento, la evaporación de agua del suelo y la transpiración de las plantas.

El encostramiento o sellado superficial ocurre bajo condiciones de intensa precipitación sobre un suelo con baja estabilidad de agregados, condiciones frecuentes en áreas críticas. La superficie cubierta con vegetación viva o muerta provee la protección mecánica para disipar la energía cinética de la lluvia, y las raíces incrementan la estabilidad de los agregados superficiales.

Como consecuencia de estos efectos se incrementan los porcentajes de agua infiltrada y disminuye la escorrentía superficial.

La ruptura y deslizamiento de materiales inestables en laderas depende de su pendiente, cohesión del material, resistencia al corte, de la humedad y la textura. La transpiración de los vegetales produce el desecamiento del suelo, por lo tanto incrementa la cohesión del material y su resistencia al corte. Estos efectos se combinan con el aumento de resistencia a la tensión de la masa del suelo generada por las raíces.

7.3.2. Propiedades hidráulicas

La tasa de remoción de material por erosión sobre una ladera puede estar regulada por la capacidad de desprendimiento del material o por la capacidad de transporte del flujo de escorrentía (Kirby y Morgan, 1980). La capacidad de desprendimiento es la propiedad por la cual un suelo es capaz de erosionarse y poner a disposición material para ser arrastrado, depende de la resistencia del material de suelo y de la velocidad del flujo de escorrentía. La capacidad de transporte es la propiedad del flujo de escorrentía de transportar ese material desprendido. Por tanto la erosión resultante dependerá de cual de estos dos procesos sea limitante.

Los suelos arcillosos presentan alta resistencia al desprendimiento del material (tanto por la energía de la gota como por la del flujo sobre la superficie), la erosión está regulada por la capacidad de desprendimiento, a pesar de que pueden generarse altas tasas de escorrentía. En el otro extremo, en suelos arenosos, la erosión está regulada por la capacidad de transporte del flujo, ya que son suelos que generan bajo escurrimiento, a pesar de que el material es fácilmente desprendido. Las situaciones con máxima erosión se dan en los materiales limosos, en los cuales hay una alta

capacidad de desprendimiento (baja cohesión) y puede haber una alta producción de escorrentía (por susceptibilidad a sellado).

La vegetación reduce el volumen escurrido y su capacidad de desprendimiento de suelo e incrementa el coeficiente de rugosidad de Manning (Capítulos 2 y 6) por lo que se reduce la velocidad del flujo sobre la superficie y la capacidad de desprendimiento de suelo.

La reducción de velocidad del escurrimiento por la vegetación, también genera una deposición (sedimentación) de partículas y, eventualmente, contaminantes asociados (por ejemplo P), lo cual permite restaurar áreas erosionadas y controlar la emisión de sedimentos a los cursos permanentes. Efectos de este tipo fundamentan el diseño de fajas buffer y fajas de cultivos, rastrillos de retención y forestación de riberas, entre otras.

7.3.3. Propiedades mecánicas

La modificación de las propiedades mecánicas del suelo por la vegetación surge de la acción de las raíces sobre el material suelto. En la mayoría de los casos los efectos son estabilizadores, aunque puede haber efectos negativos de la acción de las raíces.

Se han descripto los siguientes efectos (Styczen y Morgan, 1995):

- Reforzamiento del suelo: Las raíces y rizomas de la vegetación interactúan con el suelo para producir un material compuesto en el cual las raíces son fibras de relativamente alta resistencia a la tensión y adhesión, embebidas íntimamente en una matriz de baja resistencia a la tensión. Por lo tanto las raíces generan un aumento en la resistencia al corte del suelo, lo cual lo hace más resistente a la ruptura.

- La profundidad en el reforzamiento del suelo depende del sistema de raíces. Para gramíneas y arbustos puede llegar a 0,75-1,5 m, mientras que en árboles puede llegar a 3 m o más.

- Estabilidad de agregados por materia orgánica: Este efecto ya fue discutido en apartados anteriores y expresa la capacidad de la vegetación de generar materia orgánica humificada que incrementa la estabilidad de los materiales frente al agua y viento.

- Raíces en cuña: Las raíces pueden ejercer un efecto desestabilizante, en especial por su crecimiento entre fisuras de rocas en laderas con poco suelo. Este efecto de cuña puede provocar deslizamientos que deberán preverse al establecer vegetación especialmente arbórea en laderas rocosas.

- Anclaje/apuntalamiento y arqueo del suelo: Las raíces de árboles permiten apuntalar capas y horizontes de suelo en contacto con un manto rocoso, mediante su crecimiento primero en el suelo y luego entre las grietas de la roca. El efecto estabilizante depende de la profundidad del suelo subyacente y de la penetrabilidad de la roca: es máximo cuando existe un manto rocoso penetrable y fragmentado y una capa de suelo no muy profunda, y es mínima con una capa de suelo somera y roca poco penetrable (efecto cuña), o cuando el manto rocoso está fuera del alcance de las raíces.

El efecto de arqueo del suelo se produce por el desplazamiento de suelo que genera el crecimiento de raíces, el cual permite una estabilización extra, por efecto de la compresión del suelo entre dos árboles próximos.

- Efecto de sobrecarga: El peso del árbol sobe el suelo ejerce un potencial efecto desestabilizante, al aumentar la componente de masa total que se desliza por una ladera, en especial cuando no hay efecto de anclaje en el lecho rocoso.

Otro efecto de sobrecarga potencialmente desestabilizante se produce durante las tormentas de viento de alta intensidad, especialmente las que coinciden con suelos mojados. En estas condiciones suele producirse la caída de árboles, especialmente para especies que no han tenido suficiente crecimiento de raíces en profundidad.

7.4. Técnicas de bioingeniería

Se describen un conjunto de técnicas de bioingeniería que utilizan vegetación herbácea, arbustiva o arbórea para cumplir diferentes funciones. Algunas técnicas están discutidas en otras partes de la obra, como por ejemplo canales de desagüe empastados o fajas de cultivos a nivel. En este capítulo se discutirán las técnicas que se sintetizan en la Tabla 7.2, y que se describen a continuación.

Tabla 7.2: Sumario de técnicas de bioingeniería para control de erosión en áreas críticas.

Técnica de bioingeniería	Función/Ubicación	Tipo de vegetación utilizada
Fajas buffer	Control de descarga de sedimentos y contaminantes. Márgenes de ríos y arroyos, bordes de canales de desagüe empastados, cabeceras de lotes.	Herbácea, arbustiva.
Fajas forestales de riberas	Control de erosión en márgenes de ríos y arroyos. Control de sedimentos y contaminantes. Protección de biodiversidad.	Combinada: herbácea, arbustiva, arbórea.
Canales de desagüe	Conducción de escurrimiento, control de cárcavas.	Herbácea
Forestación de cárcavas	Control de erosión del piso de cárcava.	Arbórea, arbustiva.
Rastrillos de retención	Control de erosión de cabecera y piso de cárcava, captura de sedimentos y contaminantes.	Arbustiva, herbácea.
Estacas vivas	Control de erosión en laderas, márgenes de ríos y arroyos.	Arbórea.
Atado de ramas vivas	Control de erosión en laderas, márgenes de ríos y arroyos.	Arbórea, arbustiva.
Colchón de ramas	Control de erosión en laderas, márgenes de ríos y arroyos.	Arbustiva.
Capa de ramas y estacas vivas	Control de erosión en laderas, márgenes de ríos y arroyos.	Arbustiva.
Gavión de roca vegetado	Control de erosión en laderas, márgenes de ríos y arroyos.	Gavión, arbustiva
Pared de piedra vegetada	Control de erosión en laderas, márgenes de ríos y arroyos.	Gavión, arbustiva
Capa de rocas y estacas vivas	Control de erosión en laderas, márgenes de ríos y arroyos.	Roca, arbórea, arbustiva.
Espigones	Estabilización de márgenes de ríos y arroyos.	Arbórea, arbustiva, gavión, rocas.
Revestimientos de orilla	Estabilización de márgenes de ríos y arroyos.	Mantas, geotubos, herbácea, arbustiva.

7.4.1. Fajas buffer

Esta técnica también llamada de fajas filtro, consiste en la localización de una franja de pastura densa aledaña a canales o cursos de agua, cuya función es la captura de sedimentos y contaminantes provenientes de tierras agrícolas. Permiten además mejorar la calidad de las aguas superficiales y aumentar la biodiversidad de las cuencas.

Es una técnica que puede asociarse con el resto de las técnicas de bioingeniería vinculadas a los cursos de agua, o al control de cárcavas.

En la Figura 7.6. se observa la localización de fajas buffer asociadas a forestación de riberas de cursos y a canales de desagüe, y en la Figura 7.7 imágenes de la técnica.

El ancho de la faja buffer es variable según la importancia del curso a la que está asociada, entre 6 y 30 m.

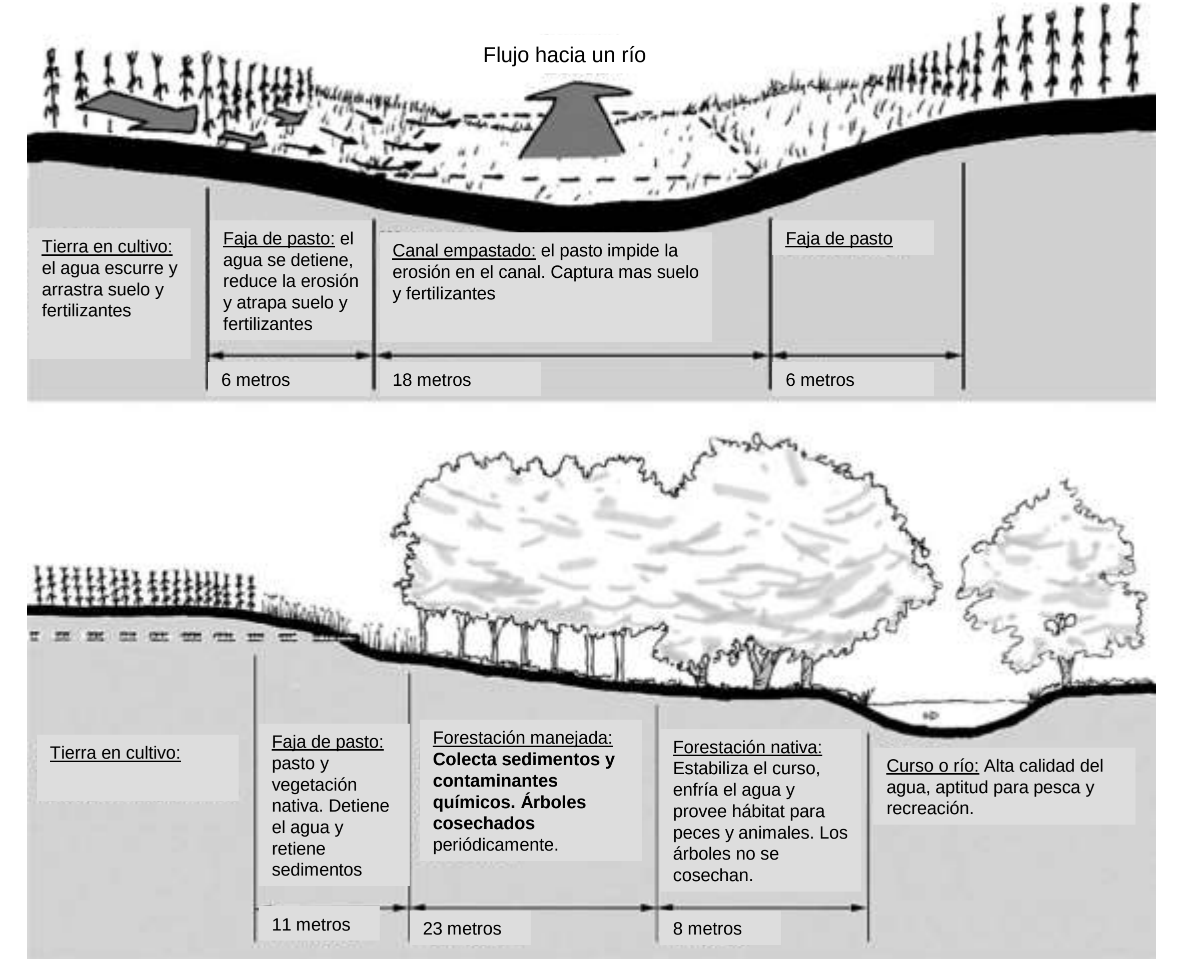


Figura 7.6: Alternativas de diseño para fajas buffer de pastos y forestación (Modificado de Anderson 2001, citado por Lovell and Sullivan, 2006).

Para la implementación de la técnica deberá analizarse la proximidad de la franja al curso de agua, la profundidad de la capa freática, la salinidad de la freática y del curso y altura y ritmo de oscilación de la corriente. Las características de implantación definirán el uso de especies glicófitas, halófitas, hidrófilas o freatófitas, en especial nativas por su adaptación ecológica y paisajística.

Las fajas buffer también pueden estar ubicadas en las cabeceras de lotes agrícolas, cumpliendo la misma función de captura de sedimentos y contaminantes. Son especialmente adecuadas en las zonas de salida de escurrimiento del lote o aguas arriba de embalses reguladores o represas (trampas de sedimento).



Faja buffer arroyo Cipion (UNRC-SECYOT)



Faja buffer en campo agrícola (NRCS-USDA)

Figura 7.7: Fajas buffer de protección de cursos permanentes.

7.4.2. Fajas forestales de riberas

Son áreas de forestación o arbustización localizada adyacente a los cuerpos de agua. Entre sus funciones se cuentan las siguientes:

- evitar la erosión de las márgenes: debido al efecto sobre la cohesión y el efecto mecánico de las raíces
- retener sedimentos y contaminantes que circulan con el escurrimiento, por disminución de la velocidad de flujo,
- mejorar la calidad y cantidad de hábitats para la vida silvestre, por la provisión de sitios y micrositios,
- denitrificar y absorber N por parte de la vegetación riparia por efecto del ambiente anaeróbico y la profundidad de raíces de gramíneas y árboles,
- mantener ambientes de humedales,
- mejora de las condiciones hidrológicas, por reducción de la velocidad de flujo y mantenimiento del régimen,
- ofrecer oportunidades para la recreación y la educación ambiental,
- mejorar la estética de los corredores de ríos, que pueden incrementar el valor de la propiedad

La técnica se aplica sobre áreas adyacentes a cursos permanentes o intermitentes, lagos, represas, mallines, depresiones y áreas con recarga de la napa freática. En la Figura 7.6 se muestra una faja forestal de 3 zonas: 2 zonas forestales y una faja buffer o filtro (Mas, 2008; Lovell y Sullivan, 2006).

La localización, disposición y densidad de las fajas de forestación de costas debe estar de acuerdo con los objetivos planteados.

La faja puede consistir de una zona (faja 1) que comienza en la línea de agua normal, o en la parte superior del banco o terraza de río, y se extiende como mínimo 5 metros medidos sobre la perpendicular al cuerpo de agua.

Se deben implantar árboles o arbustos naturales o cultivados, adaptados al sitio y aptos para los propósitos enunciados.

La preparación del sitio y la plantación debe realizarse en tiempo y forma para asegurar la supervivencia y el crecimiento de las especies seleccionadas, y sin comprometer los propósitos establecidos.

Debe controlarse la presencia de ganado, o excluirla si fuera necesario, para el óptimo establecimiento de la vegetación. En igual sentido deben controlarse las posibles plagas y enfermedades de la vegetación.

Para reducir la carga de sedimentos, material orgánico, nutrientes y pesticidas en el agua superficial, y reducir el exceso de nutrientes y otros productos químicos en napas freáticas superficiales, debe emplazarse una segunda faja (faja 2), que comienza al final de la faja 1, y se extiende como mínimo otros 7 m sobre la perpendicular al cuerpo de agua. El ancho mínimo combinando ambas fajas debe ser de 30 m, o el 30 % del plano aluvial del río, si fuera menor, pero nunca menor a 12 m.

Los criterios para la construcción de esta faja 2 son similares que para la anterior, excepto que la remoción de frutos, árboles y deshechos de madera se permiten sobre una base periódica y regular, controlando que la pérdida de vegetación o los disturbios por cosecha y extracción no comprometan los objetivos propuestos.

Antes del establecimiento de la vegetación riparia debe controlarse la erosión concentrada o los movimientos en masa en las áreas inmediatamente adyacentes a la faja 2. Esta área de control o faja 3, debe diseñarse bajo los mismos criterios de las Fajas Filtro.

Otras consideraciones de diseño son las siguientes:

- Debe evaluarse el peligro de la erosión de márgenes, y su influencia en la vegetación arbórea o arbustiva existente o posible de instalar.

- Previo a la instalación de la vegetación riparia debe garantizarse la estabilidad de los márgenes.

- Debe favorecerse el desarrollo de especies nativas o con valores múltiples, ya sea por la calidad de la madera, biomasa, frutos, renuevos para ramoneo, anidamiento, estética y tolerancia a los herbicidas.

- Deben evitarse las especies que puedan resultar hospedantes de plagas y enfermedades. Debe promoverse la diversidad de especies a los fines de evitar pérdida de funciones por ataque de pestes específicas.

- Las especies freatófitas o hidrófitas que producen depresión de capas freáticas deben usarse con precaución en áreas con déficit hídrico.

- La localización, disposición y densidad de las fajas deben estar integradas al paisaje natural.

- Debe programarse un correcto manejo de la vegetación arbórea de las fajas para evitar que el desarrollo de las mismas y/o la caída de ramas y troncos no modifique las condiciones hidráulicas del curso de agua protegido.

En la Figura 7.8. se observan algunos ejemplos de fajas forestales de ribera.



Vista aérea del Arroyo Santa Catalina con y sin faja forestal de rivera.

Construcción de faja forestal sobre el río Cuarto.



Faja forestal sobre un tramo del arroyo Ají.

Faja forestal sobre el arroyo El Cipión-La Colacha.

Figura 7.8: Fajas forestales de ribera (SECYOT-UNRC).

7.4.3. Canales de desagüe

Estructuras de tierra empastadas de forma parabólica o trapezoidal encargada de conducir excedentes de escurrimiento en las vías de drenaje de las cuencas. Sus principios de diseño y dimensionamiento se discutieron en el Capítulo 6.

7.4.4. Forestación de cárcavas

Técnica consistente en la plantación forestal del interior de las cárcavas para estabilizar mecánicamente el piso y promover la sedimentación y paulatino aumento del nivel de base (Capítulo 3).

El diseño de plantación puede ser en tres-bolillo o en hileras perpendiculares a la dirección del agua, evitando dejar corredores de flujo que puedan concentrar la

erosión entre las hileras o sobre las paredes laterales de la cárcava. La condición del suelo suele ser pobre, ya que se encuentra frecuentemente con un sedimento calcáreo, frecuentemente cementado; por esta razón deben elegirse especies adaptadas a condiciones limitantes.

La forestación de cárcavas puede asociarse a las técnicas de rastrillos de retención y al parabolizado de cabeceras (Capítulo 6). En la Figura 7.9 se muestran algunos ejemplos de utilización de forestales para la estabilización del piso de cárcavas.



Forestación de piso de cárcava, zona Cuatro Vientos (SECYOT-UNRC)..

Cárcava forestada estabilizada, zona La Aguada (SECYOT-UNRC)..



Cárcava forestada, zona Rodeo Viejo (SECYOT-UNRC).



Imagen satelital de una cárcava forestada, zona La Aguada (Google Earth).

Figura 7.9: Forestación de cárcavas.

7.4.5. Rastrillos de retención

Son estructuras vegetadas o rígidas transversales a la dirección de avance de la cárcava, cuya finalidad es estabilizar el piso de la misma y capturar los sedimentos de la corriente (Figura 7.10). Los rastrillos vegetados utilizan los principios de la bioingeniería a través de su efecto mecánico e hidráulico sobre el escurrimiento circulante por la cárcava.

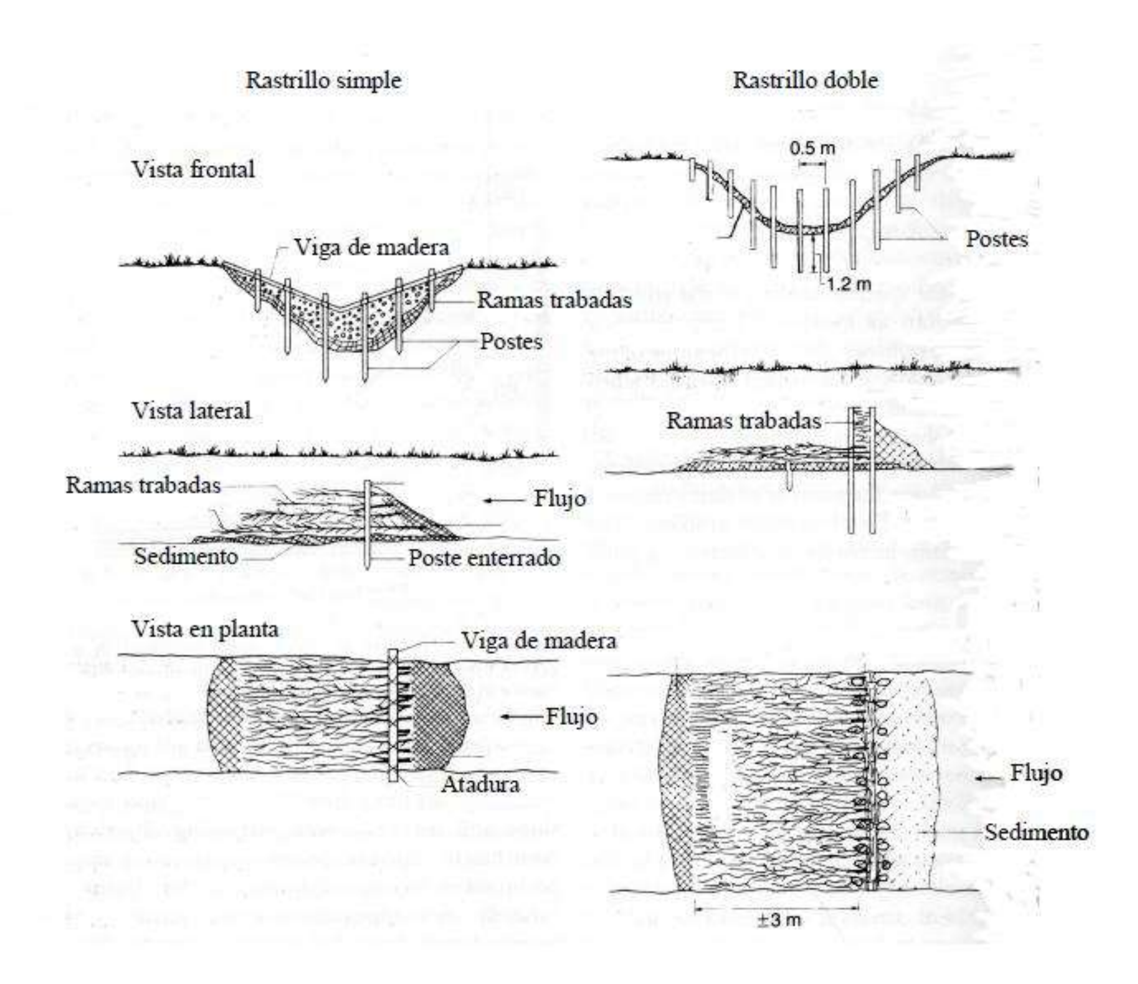


Figura 7.10: Dos tipos de rastrillos de postes y ramas para control de erosión en cárcavas (Modificado de Morgan y Rickson, 1995).

En cuencas torrenciales se utilizan rastrillos o estructuras de retención rígidos o semirígidos (gavión) para la captura de sedimentos y la reducción de pendiente del torrente (TRAGSA, 1994, Figura 7.11); se aplican a cuencas torrenciales donde hay remoción de alta cantidad de sedimentos gruesos y rocas, que requieren de estructuras de alta resistencia.



Figura 7.11: Rastrillos de retención de gavión en una cárcava de torrente (UNRC-SECYOT).

Los rastrillos basados en bioingeniería se aplican en situaciones donde hay sedimentos finos, en pisos de cárcavas o cursos de relativamente baja pendiente.

Consisten en la plantación de estacas vivas o troncos secos en dirección perpendicular a la dirección de la cárcava, con una separación entre ellos dependiente de la pendiente, bajo el criterio de que la altura de un rastrillo debe coincidir con la mitad de la altura del rastrillo localizado aguas arriba (ver criterios para espaciamiento de bordos para recuperación de pisos de cárcavas, Capítulo 6).

Los ratrillos pueden tomar variados diseños, aunque todos ellos incluyen una empalizada de estacas vivas o postes. Luego pueden realizarse diferentes diseños de entramados de ramas para aumentar la rugosidad del rastrillo (Figura 7.10.)

7.4.6. Estacas vivas

La técnica consiste en la inserción y cubrimiento de estacas enraizables en el suelo. El sistema de estacas vivas crea un entramado de raíces, las que estabilizan y refuerzan la masa del suelo, al unir las partículas y aumentar la cohesión del suelo por desecamiento (Figura 7.12).

Esta práctica es apropiada para reparar deslizamientos o pequeños derrumbes en zonas frecuentemente húmedas, meandros, bordes de ríos o arroyos con pendiente excesiva. Mejora las condiciones para el establecimiento de otras especies naturales del lugar, y puede ser utilizada en conjunto con otras técnicas de bioingeniería, tales como la de atados de ramas vivas.

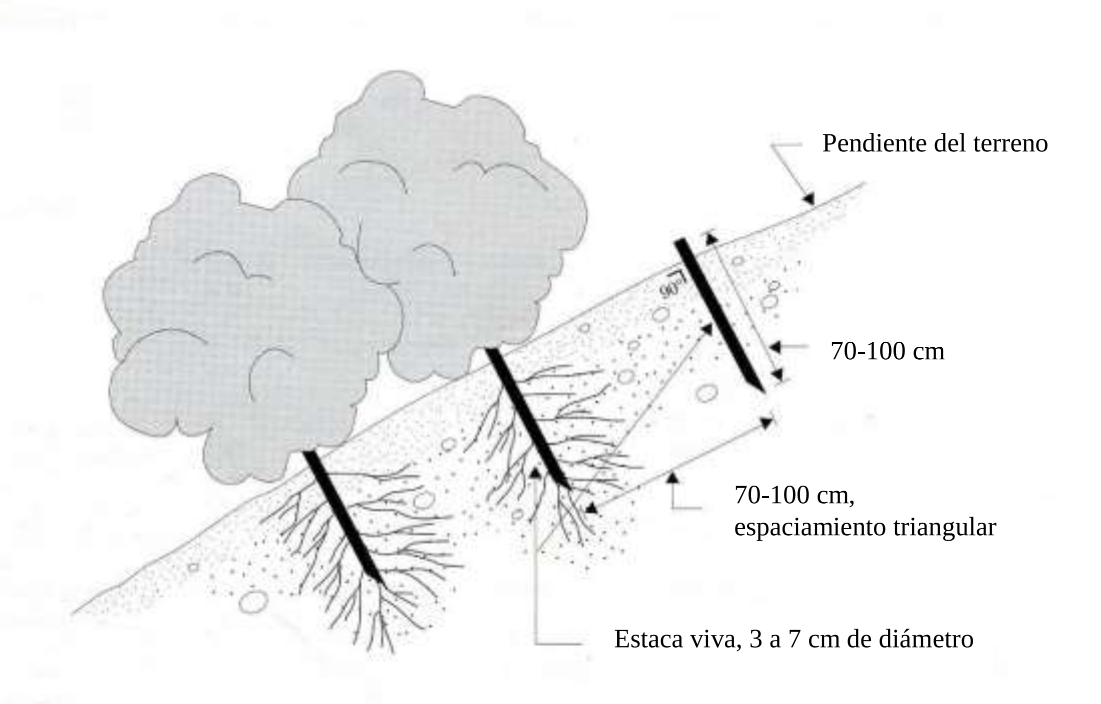
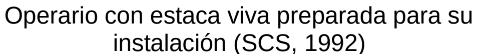


Figura 7.12: Esquema de la técnica de estacas vivas (Modificado de SCS, 1992)

Las estacas deben tener entre 3 y 7 cm de diámetro y 60 a 90 cm de largo, su corteza debe estar intacta y deben removerse todas sus ramas. La base debe cortarse en ángulo agudo para una más fácil inserción en el suelo, y la parte superior debe cortarse en ángulo recto (Figura 7.13).





Operario con estaca viva preparada para su instalación (SCS, 1992)



Estacas vivas brotando en un meandro del río Cuarto (SECYOT-UNRC)

Figura 7.13: Uso de estacas para protección de taludes, riberas y medanos.

Las estacas deben ser implantadas el mismo día que se preparan para evitar su desecamiento y envejecimiento. Deben clavarse en ángulo recto con la superficie del terreno, y dispuestas en un diseño triangular —en cada línea las estacas se colocan desplazadas lateralmente de 30 a 45 cm, a fin de no enfrentar a las estacas de las líneas superior e inferior (sistema de plantación en tresbolillo). La separación entre estacas debe ser de 60 a 90 cm con una densidad aproximada de 2 a 4 estacas por m^2.

Al final de este capítulo se señalan las especies nativas y exóticas aptas para la realización de esta técnica en los ambientes representativos del centro argentino.

7.4.7. Atado de ramas vivas

Técnica consistente en un conjunto de ramas de especies de fácil brotación y enraizamiento, atadas a modo de largos cilindros. Estos atados son enterrados en pequeñas trincheras y afirmados al terreno con estacas de madera viva o muerta. Las trincheras son cavadas en dirección perpendicular a la pendiente (cortando la pendiente). El resultado es la contención del deslizamiento, ya que la longitud de las pendientes disminuye al disminuir la distancia entre trincheras. Funcionan además atrapando partículas del suelo (Figuras 7.14 y 7.15).

Es una práctica adecuada para zonas con pendientes rocosas en las que se presentan dificultades para cavar trincheras de mayor profundidad. Esta práctica crea un microclima propicio para el establecimiento de otros tipos de vegetación.

Las ramas deben provenir de brotes jóvenes de especies con alta capacidad de enraizamiento y brotación, y deben ser lo suficientemente rectas y largas para armar los atados. Pueden usarse ramas jóvenes de sauces u otros arbustos.

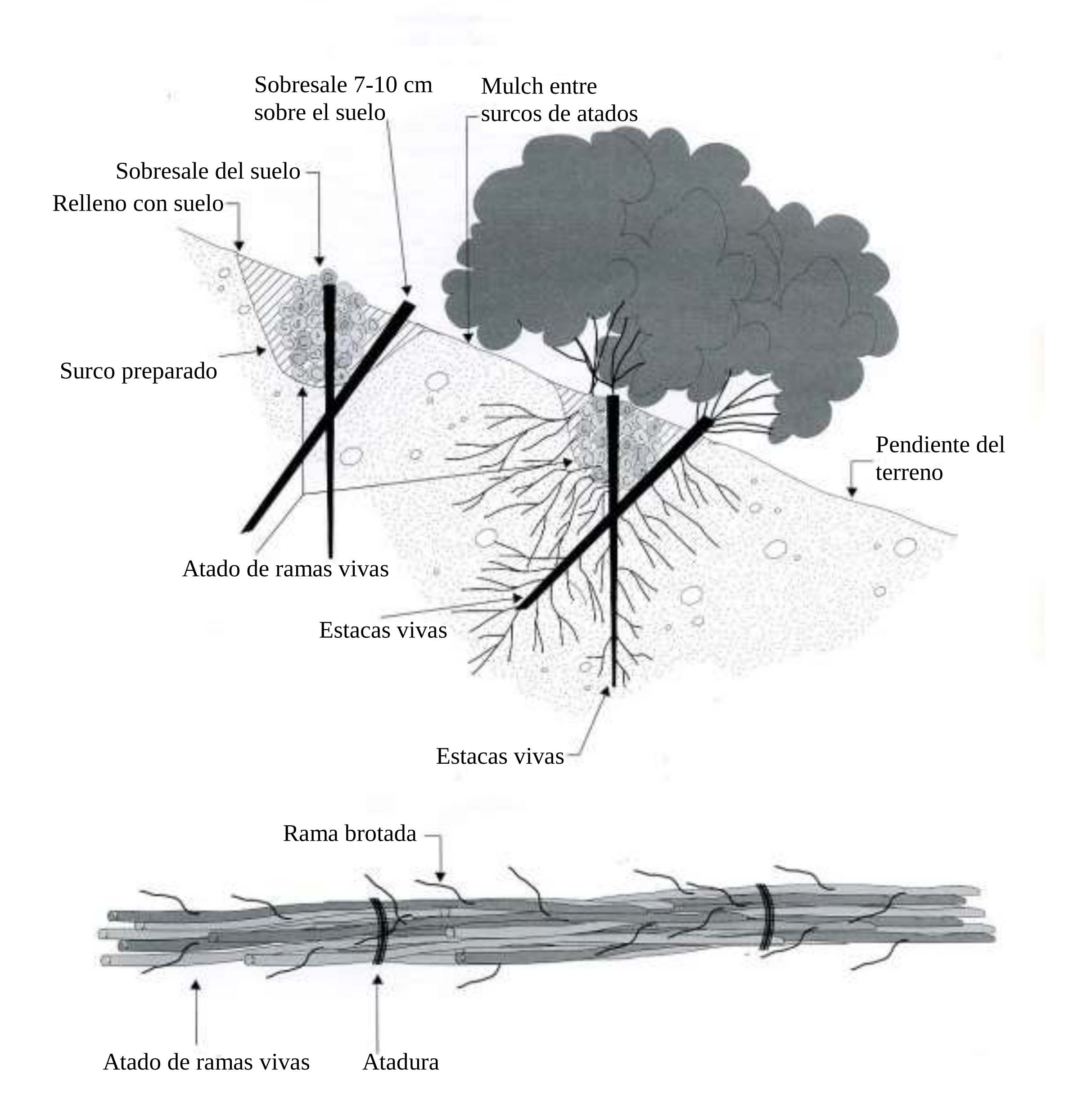


Figura 7.14: Esquema de la técnica de atado de ramas vivas (Modificado de SCS, 1992)

Los cortes deben unirse formando atados de 1,5 a 9 m o mayores, dependiendo de las limitaciones para su manipulación y de las condiciones del sitio. Los atados deben armarse con todos los brotes orientados en la misma dirección, y con un diámetro de entre 15 y 20 cm. Las puntas de las ramas deben ordenarse de modo que queden uniformemente distribuidas en el atado.

Las estacas vivas que cumplen la función de anclaje de los atados, pueden tener una longitud variable entre 70 y 90 cm, y deben prepararse el mismo día de la instalación.

Los atados vivos deben ser asegurados mediante estacas de madera clavadas a través y por debajo del atado, con una longitud de 1 m, y un ancho de 2” x 4”.

La colocación se realiza cavando una pequeña trinchera del tamaño del atado, siguiendo una línea a nivel, luego se coloca el atado dentro de la trinchera. Una vez colocado el atado, se clavan las estacas vivas directamente sobre el atado, en espaciamientos de 60 a 90 cm. Las estacas muertas deben colocarse a tresbolillo de las vivas, permitiendo que sobresalga su parte superior fuera del atado. Una vez enterrado se debe rellenar con tierra húmeda el atado, de manera tal que algunas de sus ramas sobresalgan sobre el terreno.





Colocación de atado de ramas vivas (www.riparianhabitatrestoration.ca)



Atado de ramas vivas brotado (www.terraerosion.com)

Figura 7.15: Atado de ramas vivas.

7.4.8. Colchón de ramas

Técnica similar a la anterior. Consiste en la colocación de ramas vivas en pequeñas trincheras o bancales excavados siguiendo las curvas de nivel Se diferencia por la disposición de las ramas en relación a la pendiente, y por la profundidad a la que son enterradas. Para formar la capa de arbustos, las ramas se colocan en dirección perpendicular a las líneas a nivel (Figuras 7.16 y 7.17). De esta forma se aumenta la efectividad en cuanto al reforzamiento del suelo y la estabilización de la ladera.

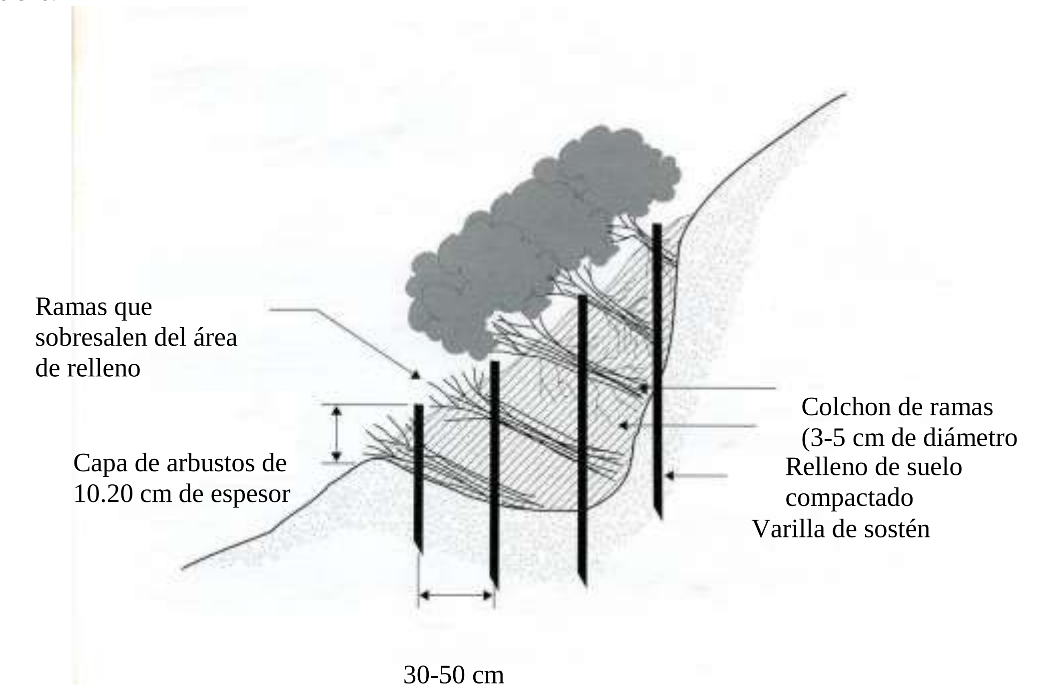


Figura 7.16: Colchón de ramas (Modificado de SCS, 1992).

La trinchera puede tener de 60 a 100 cm de ancho. Las ramas dentro de la trinchera sirven para dotar de estabilidad a la masa de suelo, y las porciones que sobresalen ayudan a controlar la erosión de la ladera.



Colocación de colchón de ramas (SCS, 1992)



Colocación de colchón de ramas (SCS, 1992)

Figura 7.17: Colchón de ramas para estabilización de una ladera.

Se aplica en condiciones similares a las de la práctica anterior, en pendientes de hasta 25 %, y no mayores a 5 m de altura.

Las capas desarrollan varias funciones:

- Dividen la pendiente en tramos cortos, separados por un surco de arbustos.
- Refuerzan el suelo mediante las ramas aun no brotadas, y una vez ocupado por las raíces aumentan la resistencia del suelo al corte y al deslizamiento.
- Estabilizan la ladera cuando las ramas producen follaje
- Atrapan sedimentos
- Aumentan la infiltración del agua
- Drenan sitios excesivamente húmedos.
- Promueven la implantación de otras especies, al mejorar las condiciones para su germinación y desarrollo.

Las ramas deben tener un diámetro de 3 a 5 cm, y longitud suficiente para sobresalir de la trinchera. La construcción se realiza cavando trincheras de 60 a 90 cm de ancho en líneas a nivel. Si es necesario mejorar el drenaje de las trincheras, deben cavarse en líneas con mínima pendiente, de alrededor del 0,3%. La trinchera debe construirse de modo tal que la cara exterior quede más alta que la cara interior, para mejorar la retención del agua.

Las ramas deben acomodarse en un diseño entrelazado, para mejorar su capacidad de anclaje. Luego de colocadas las ramas la trinchera deberá rellenarse con tierra apisonada para eliminar los espacios de aire. Las puntas de las ramas deben quedar fuera de la superficie para atrapar sedimentos. Cada trinchera es

rellenada con la tierra sacada de la inmediata superior. La zona entre trincheras debe protegerse con algún mulch o tela geotextil, en especial en pendientes mayores a 15 %.

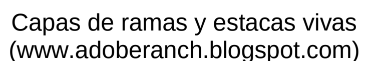
Las trincheras podrán espaciarse entre 90 y 150 cm unas de otras, dependiendo de la pendiente del terreno y su estabilidad.

7.4.9. Capa de ramas y estacas vivas

Constituye una variante de la técnica anterior, a la que se le agregan estacas para la sujeción de la capa de ramas, en lugar de varillas de sostén. Por otra parte la capa de ramas se coloca directamente apoyada sobre la pendiente a controlar, y las estacas hacen de contención para evitar su desplazamiento por acción del agua. La sujeción de la capa de ramas al piso puede hacerse mediante diferentes métodos: estacas vivas, postes, postes y entramado de ramas, geotextiles, etc. (Figura 7.18.), variando su espaciamiento en función de la pendiente del terreno a tratar.






Capas de ramas y estacas vivas (www.adoberanch.blogspot.com)

Capas de ramas y estacas vivas sobre márgenes el río Cuarto (UNRC-SECYOT)



Estacas vivas atadas a la base de los árboles (sauces) para la protección de taludes de las riberas del río Cuarto (SECYOT-UNRC).

Figura 7.18: Capa de ramas y estacas vivas.

Esta técnica puede estar asociada a la técnica de estacas vivas, en estados avanzados de brotación, y especialmente cuando se utilizan sauces como estacas. Al segundo o tercer año de la estaca se está en condiciones de podar los ejemplares provenientes de estacas y transformar esa poda en una capa de ramas (Figura 7.18. derecha) que se establece sobre la superficie a controlar. De este modo las nuevas ramas generan superficies vegetadas adicionales que luego servirán como fuentes de estacas y ramas para otras áreas en recuperación.

7.4.10. Gavión de roca vegetado

Los gaviones son contenedores rectangulares fabricados con alambre galvanizado con triple torsión en una malla hexagonal, que son rellenados con piedras y tierra y unidos unos con otros mediante costuras del mismo alambre.

Los gaviones de roca vegetados se utilizan para la contención de derrumbes mediante la construcción de pequeños muros en la base de las laderas, lo que produce una disminución de la pendiente. Entre un gavión y otro se coloca un entramado de ramas vivas, que luego de enraizadas y brotadas, ayudan a la estabilización de la estructura (Figuras 7.19. y 7.20.).

No están diseñados para resistir grandes esfuerzos laterales por lo que deben ser construidos con una altura máxima de 1,5 m, incluida la excavación.

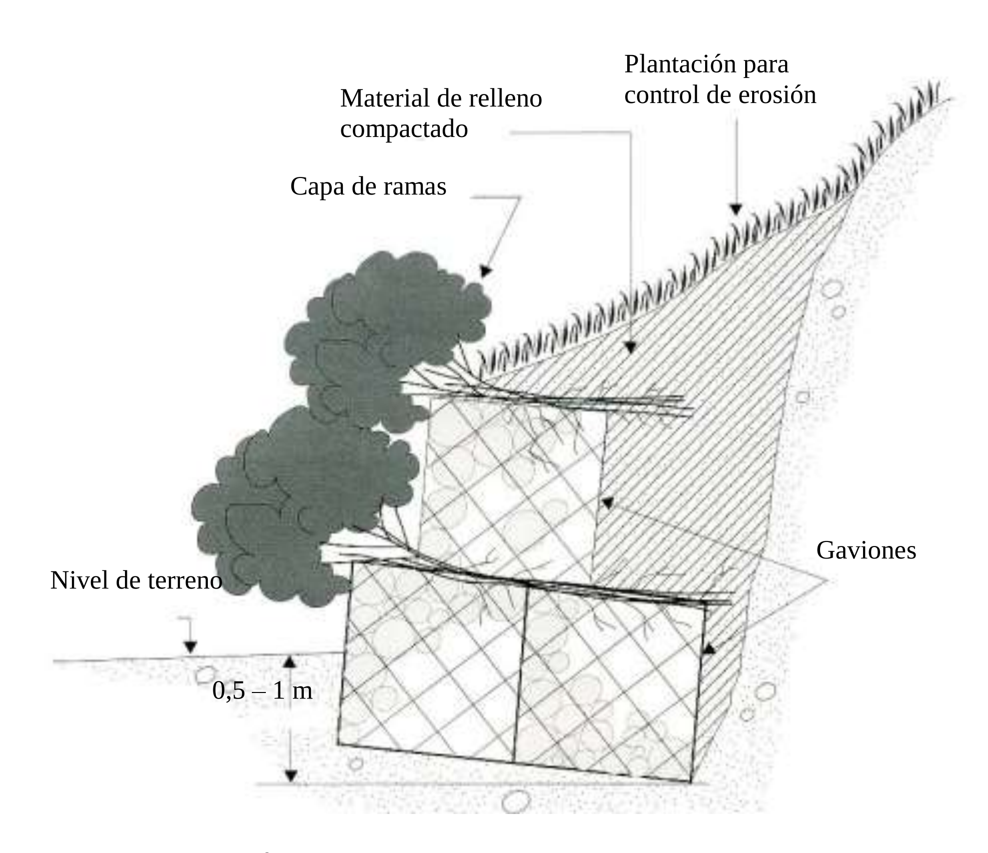


Figura 7.19: Gavión de rocas vegetado (modificado de SCS, 1992).

La capa de ramas tiene similares características a la técnica anterior, con una longitud que permita a las ramas sobresalir del borde del gavión.

El gavión incluye los canastos de alambre y la piedra para relleno, su construcción debe realizase de tal manera que las piedras más grandes se colocan en la periferia y las más pequeñas en el centro, mezcladas con tierra para mejorar el enraizamiento de las estacas.



Figura 7.20: Estabilización de laderas con gaviones en la base del talud. Se utilizan troncos en líneas transversales a la pendiente sostenidos por postes enterrados. Entre las hileras de troncos se hace la plantación de vegetales herbáceos y arbustivos. (Aluminé, Neuquén, SECYOT-UNRC).

La instalación comienza por la parte más baja de la pendiente, excavando el material suelto 50-100 cm de profundidad, hasta una fundación firme. La excavación de la fundación deberá hacerse de modo que la parte interna quede más baja que la externa, a los fines de dotar de mayor firmeza a la estructura y permitir un mejor enraizamiento de las estacas.

Las estacas vivas se colocan entre los canastos en dirección perpendicular a la pendiente, con los brotes hacia el exterior y sobresaliendo del extremo del gavión.

7.4.11. Pared de piedra vegetada

Esta técnica es una combinación de rocas y ramas de arbustos usadas para estabilizar y proteger la base de pendientes pronunciadas e inestables. Las paredes de roca vegetada difieren de las estructuras convencionales de apoyo de laderas, en que están apoyadas en suelo no disturbado, y no están diseñadas para resistir altas presiones de apoyo laterales (SCS, 1992).

Esta técnica es apropiada para reducir la pendiente y estabilizar laderas con una pared relativamente baja, y donde la disponibilidad de rocas sea alta.

Se utilizan trozos de ramas vivas de un diámetro entre 2 y 4 cm con longitud suficiente como para sobresalir de las rocas, y quedar enterradas en la tierra de la ladera. Las rocas deberán tener un diámetro de entre 25 a 50 cm, las mayores irán ubicadas en la base o fundación de la pared (Figuras 7.21 y 7.22).

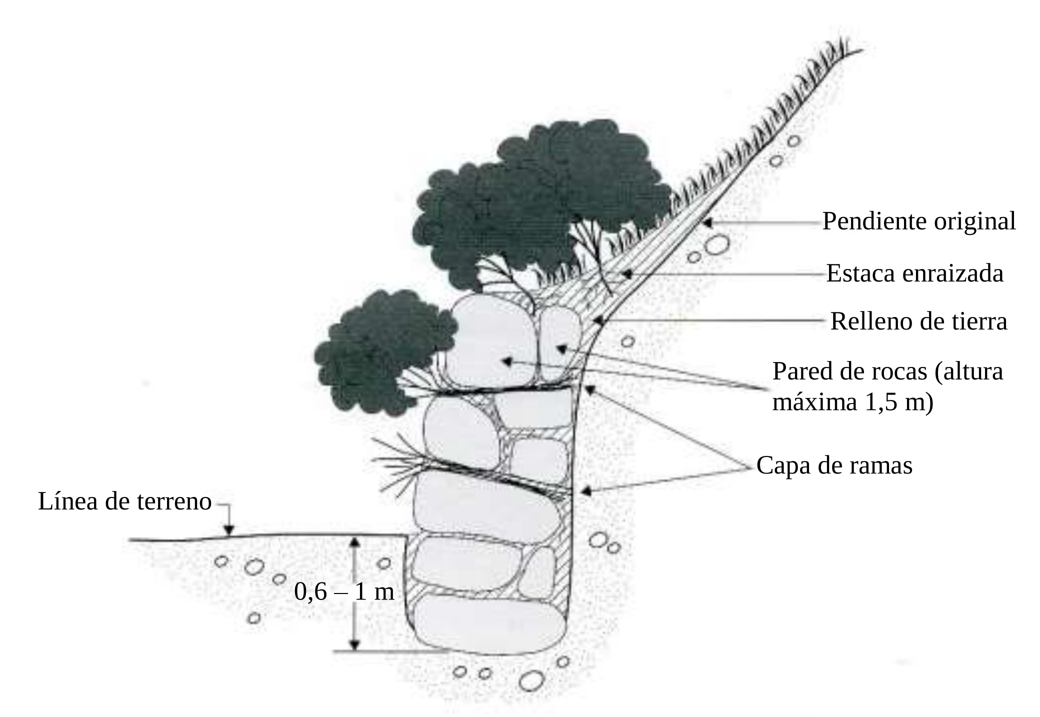


Figura 7.21: Pared de piedra vegetada (Modificado de SCS, 1992)



Figura 7.22.: Estabilización de laderas con base de piedras, forestación y vegetación herbácea. (Guriezo, España, SECYOT-UNRC)

7.4.12. Capa de rocas y estacas vivas

Esta técnica, también conocida como riprap vegetado, consiste en la colocación de estacas enraizables entre las juntas de un colchón de rocas colocadas sobre una pendiente, un talud o una margen de curso de agua (Figura 7.22.). El sistema de raíces ayuda a reforzar el suelo e impide el lavado de material fino entre la roca.

Las estacas deben ser de material fresco y con la corteza sana, con un diámetro de 2 a 3 cm, con la suficiente longitud para atravesar la capa de rocas y penetrar en el suelo debajo de la capa de rocas. Las estacas pueden clavarse luego del relleno de rocas o simultáneamente con él.

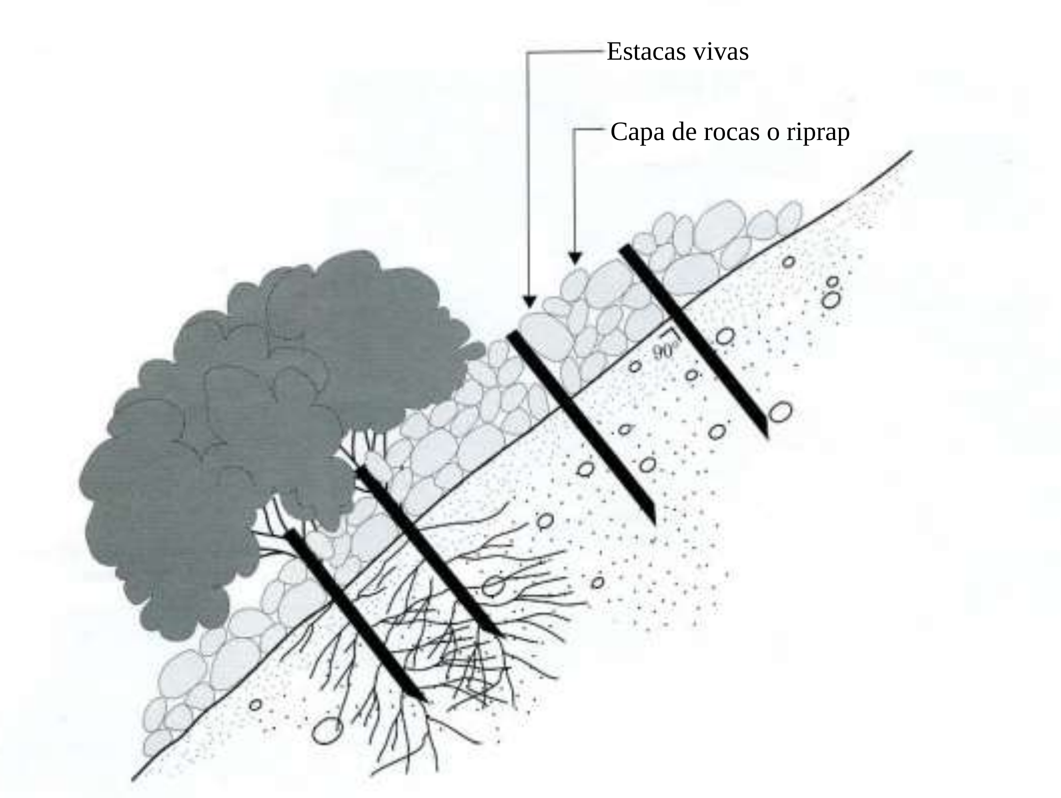


Figura 7.23: Capa de rocas y estacas vivas (Modificado de SCS, 1992)

7.4.13. Espigones

Son estructuras transversales ubicadas en el lecho de cauces permanentes, ancladas en la margen, y cuya dirección puede estar orientada aguas abajo o aguas arriba del curso de agua (Figuras 7.24 y 7.25).

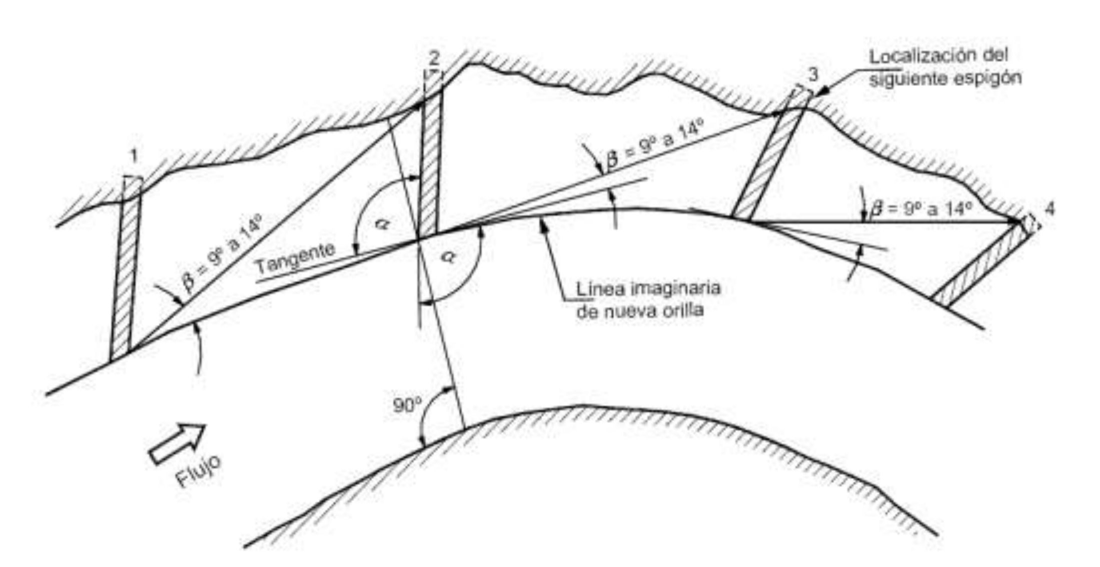


Figura 7.24: Esquema de la localización de espigones en un río (Nótese que son espigones orientados aguas arriba).



Margen de río con espigones de piedra suelta, colchón de ramas vivas y estacas



Imagen de la izquierda en época de brotación.



Gaviones y Espigones en el río Chaltén (UNRC-SECYOT)



Espigones de gavión

Figura 7.25: Espigones.

El principio de funcionamiento de los espigones es el de desviar los filetes de la corriente hacia el centro del cauce para evitar su acción erosiva contra los márgenes, con lo cual se logra:

- Estabilizar las márgenes en cauces meandrosos,
- Reducir la erosión de fondo y de márgenes,
- Reducir la carga de sedimentos de los cursos permanentes.

La técnica se aplica en ríos de régimen torrencial o ríos de llanura (Figura 7.26.) con sectores donde las técnicas de bioingeniería no son suficientes para estabilizar las márgenes. Especialmente indicadas en curvas y contracurvas de cursos cuyos materiales son muy susceptibles a la erosión por la corriente, significando riesgos para la infraestructura urbana o vial.

Los puntos más importantes a tomar en cuenta al diseñar una protección de márgenes en base a espigones son (TRAGSA, 1994):

- Localización en planta: sobre el plano en planta del área de trabajo se marca el eje del río, y paralela a este eje se traza una línea cercana a la orilla. La longitud de cada espigón está dada por la distancia desde la orilla real hasta esta línea cercana a la orilla. La localización en planta debe realizarse ya sea al proyectar una defensa de la orilla natural o al proyectar una margen nueva, por ejemplo, al rectificar un curso.



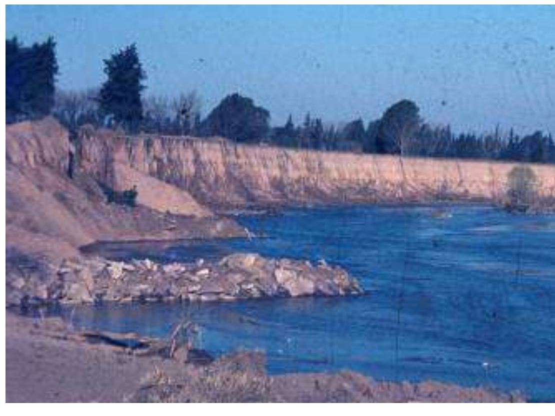



Figura 7.26: Replanteado en el terreno el proyecto de protección de la ribera se comienza la construcción de espigones aguas arriba, al inicio de la curva a proteger. La imagen derecha muestra la protección dada por la vegetación y la estabilidad creciente del sistema de espigones (SECYOT-UNRC)

- Longitud de los espigones: La longitud total de un espigón se divide en *longitud de anclaje*, aquella que va empotrada en la orilla, y *longitud de trabajo,* la que está dentro de la corriente.
- La longitud de trabajo L_T conviene que esté dentro de los límites establecidos por la siguiente ecuación (TRAGSA, 1994):

$$h \leq L_T \leq B/4$$

Donde:
h es la altura media del río,
B el ancho medio del cauce.

Los primeros espigones que se construyen deben ser de poca longitud y bajo ángulo de ataque a efectos de lograr un paulatino desplazamiento de los filetes de agua del curso hacia el centro de curso evitando procesos erosivos en las márgenes.

Por economía se recomienda que la longitud de anclaje sea la menor posible. La técnica más utilizada es la de emplazar los espigones directamente sobre la margen, ya que resulta más económico reparar algunos pocos espigones dañados por la primera creciente que empotrar todos contra la margen. Se debe tener especial precaución de dar un buen anclaje al primer gavión para evitar que los vórtices de la corriente de agua que se generan sobre la línea de unión ribera/gavión erosionen la ribera y la corriente de agua se introduzca por la espalda de gavión, lo que haría colapsar al sistema.de defensa.

- Separación de los espigones: La separación entre espigones se mide en la orilla. Considerando dos espigones, la separación depende de la longitud del espigón ubicado aguas arriba. Para calcularla se toma en cuenta el ángulo de inclinación del espigón respecto de la orilla aguas abajo, y la ampliación teórica de la corriente al pasar por el extremo del espigón. El ángulo de inclinación es de 9 a 14º (Figura 7.24). Se debe cuidar que el desvío de los filetes principales del curso desviado impacten sobre el centro del espigón aguas abajo y no sobre la ribera anterior al anclaje de ése espigón, ya que se correría el riesgo de erosión de la margen.

- Materiales de construcción: Los espigones pueden construirse con una gran variedad de materiales, tales como madera, troncos y ramas, piedras, restos de demoliciones, elementos prefabricados de hormigón, bolsas de arena. Las estructuras mas usuales formadas con algunos de estos materiales son tablestacados (de madera), de escollera (piedras de grandes dimensiones) y gaviones (canastos de alambre tejido relleno con piedras). Los materiales y estructuras deben ser suficientemente resistentes para soportar el empuje de la corriente y de los troncos y ramas que vienen con ella. En un meandro ubicado en terrenos de la UNRC, se construyeron espigones con bloques de hormigón y restos de demolición de una antigua pista de aviación. Los bloques de mayor dimensión deben colocarse en la base, enfrentados a la dirección del flujo, especialmente en el sector hacia el centro del curso. Los bloques de escombros mezclados con tierra deben compactarse y tener incorporados, desde el piso y en el centro, cubiertas de materiales impermeables (geotextiles o láminas de plástico) para eliminar eventuales filtraciones.

- Obras de bioingeniería complementarias: Cumplen la función de estabilización de márgenes. Pueden utilizarse las prácticas discutidas anteriormente para los sectores entre espigones: plantación de estacas vivas, forestación de márgenes, atado de ramas vivas, colchón de ramas, etc. Las estacas vivas transformadas en árboles establecidos, se cortan en nuevas estacas y entierran en el fondo para lograr nuevos árboles. Los atados de ramas se fijan a la base de los troncos y a las estacas enterradas, con ello se logra una disminución de velocidad de agua y la sedimentación de partículas arrastradas por la corriente. Se crea un sistema biodinámico de estabilización creciente.

7.4.14. Revestimientos de orillas de cursos de agua

Representan un conjunto de técnicas combinadas de vegetación y estructuras rígidas o semirígidas, cuya finalidad es impedir la erosión y estabilizar los márgenes de ríos o arroyos y cursos temporarios, o impedir el daño por oleaje en lagos, embalses, etc. Son técnicas complementarias a las técnicas de bioingeniería vistas, en situaciones donde el uso de éstas no genera la suficiente seguridad en la estabilización de la costa, o donde la ubicación y riesgos de ruptura ameritan en uso de técnicas de mayores costos (costas de ríos en poblaciones, en proximidades de rutas, embalses reguladores, etc.).

Los dos principios básicos de estas obras son: 1) Utilizar un material que resista la velocidad de arrastre y 2) Solucionar satisfactoriamente el enlace entre el revestimiento y el lecho, de forma que no se produzca la socavación de la parte más baja y el posterior desplome de la estructura.

Numerosas técnicas se utilizan como revestimientos de orillas, las principales son las siguientes:

- Empalizada de troncos y estacas vivas
  Es la técnica de bioingeniería más sencilla. Consiste en la plantación de estacas vivas y en la colocación de empalizadas protectoras en el margen. Requiere la realización de trabajos previos de perfilado del talud (ataludado), a los fines de proveer de una superficie adecuada para la plantación (Figura 7.26.). La mayor parte de la protección de márgenes del río Cuarto se ha hecho en base a esta técnica, que busca imitar la situación de una costa vegetada natural.

- Pantallas inclinadas de bloques de hormigón
  Técnica consistente en el uso de mantas o pantallas de una fibra geotextil especial que lleva adheridos bloques de hormigón resistentes a la erosión comercializados bajo el nombre FLEXMAT (www.cat1.com.ar). La fibra permite el crecimiento de vegetación herbácea, con lo cual la técnica tiene una componente de bioingeniería. Al igual que la anterior la técnica requiere la preparación de talud, previo a la colocación de la manta (Figura 7.27.).



Figura 7.27: Revestimiento de orilla mediante pantallas con bloques de hormigón, costa del río Cuarto (UNRC-SECYOT).

- Bloques de hormigón intertrabados con vegetación herbácea, muros de piedras.
  Esta técnica utiliza estructuras de hormigón de formas variadas colocadas en la costa a modo de muro de contención de la corriente o del oleaje. También se pueden utilizar piedras o roca de tamaño grande revistiendo el talud de la margen, con el mismo propósito, similar a la técnica de pared de piedra vegetada (Figura 7.22.).

- Muro de gaviones
  Consiste en la colocación de una estructura longitudinal de gavión para la protección de la costa, el cual puede estar o no vegetado (ver técnica de gavión de rocas vegetado y Figura 7.28.). La costa queda revestida por una estructura semirígida de gavión, apoyada sobre suelo convenientemente consolidado para evitar su colapso.




Figura 7.28: Muros de gaviones (www.ecomur.com.mx).

- Muros de contención con Geocontenedores

Los geocontenedores son tubos de geotextil permeable al agua, pero impermeables al paso de arena, que se rellenan con material inerte (arena, grava) y son colocados en las márgenes de los cursos con equipamiento especial (Figura 7.29.). Idealmente, los contenedores se pueden rellenar con la arena del lugar o pueden ser transportados llenos desde otras zonas. Debido a su carácter poroso el geotextil permite el desarrollo de vegetación, con lo cual la estructura termina cumpliendo las funciones de bioingeniería.



Figura 7.29: Geocontenedores, geotubos (www.cat1.com.ar).

7.5. Especies de plantas vasculares de la flora de la provincia de Córdoba (Argentina) con uso potencial en la protección de laderas y riberas de lagunas y cursos de agua centroargentinas.

En base al conocimiento de la distribución y relaciones con el ambiente donde viven, se citan las especies de plantas vasculares del centro de Argentina con posibilidades de ser empleadas en planes de protección de laderas de montaña y márgenes de cursos de agua y lagunas y otras técnicas de bioingeniería. Todas las especies citadas en la Tabla 7.3 crecen en forma espontánea en la provincia de Córdoba, tienen diferentes localizaciones en sus poblaciones y pueden ser coleccionadas como semillas, frutos u otros órganos de propagación vegetativa. Se anexa el riesgo de invasión que pueden potencialmente generar y el nombre vulgar conocido.

Tabla 7.3: Especies vegetales de interés para el uso en bioingeniería en el Centro Argentino.

Nombre vulgar	***Especie***	**Origen**	**Hábito**	**Tolerancia anega-miento**	**Tolerancia sequía**	**Tolerancia salinidad**	**Riesgo de invasión**
Arce	*Acer negundo*	Exótica	Árbol	X			x
Garabato negro	*Acacia atramentaria*	Nativa	Árbol		X		
Garabato blanco	*Acacia bonariensis*	Nativa	Árbol		X		
Espinillo	*Acacia caven var. dehiscens*	Nativa	Árbol		X		x
Espinillo	*Acacia caven var. caven*	Nativa	Árbol		X		
Espinillo blanco	*Acacia farnesiana*	Nativa	Árbol		X		
Garabato hembra	*Acacia praecox*	Nativa	Árbol		X		x
Visco	*Acacia visco*	Nativa	Árbol		X		
Romerillo	*Acanthostyles buniifolium*	Nativa	Arbusto		X		
Pita	*Agave americana*	Adventicia	Hierba		X		x
Usillo	*Aloysia gratissima var. gratissima*	Nativa	Arbusto		X		
Árbol del pan	*Ailanthus altissima*	Exótica	Árbol		X		
Cebil	*Anadenanthera colubrina var. cebil*	Nativa	Árbol		X		
Caña de Castilla	*Arundo donax*	Exótica	Arbusto		X		x
Quebracho blanco	*Aspidosperma quebracho-blanco*	Nativa	Árbol		X		
Zampa	*Atriplex lampa*	Nativa	Arbusto			X	x
Cachiyuyo	*Atriplex undulata*	Nativa	Arbusto			X	x
Chilca	*Baccharis flabellata*	Nativa	Arbusto		x		
Chilca	*Baccharis juncea*	Nativa	Arbusto	x			x
Chilca	*Baccharis salicifolia*	Nativa	Arbusto	x			x
Chilca	*Baccharis tucumanensis var. myrtilloides*	Nativa	Arbusto		x		
Pezuña de vaca	*Bauhinia forficata ssp. pruinosa*	Nativa	Árbol	x			x
Tala falso	*Bougainvillea spinosa*	Nativa	Árbol		x		
Tala falso	*Bougainvillea stipitata*	Nativa	Árbol		x		
Chaguar	*Bromelia serra*	Nativa	Hierba		x		
Morera de papel	*Broussonetia papyrifera*	Adventicia	Árbol		x		x
Salvia blanca	*Buddleja cordobensis*	Nativa	Arbusto		x		
Salvia blanca	*Buddleja mendozensis*	Nativa	Arbusto		x		
Retama	*Bulnesia retama*	Nativa	Arbusto		x		
Lagaña de perro	*Caesalpinia gilliesii*	Nativa	Arbusto		x		
Lagaña de perro	*Caesalpinia mimosifolia*	Nativa	Arbusto		x		
Guayacan	*Caesalpinia paraguariensis*	Nativa	Árbol		x		
Atamisqui	*Capparis atamisquea*	Nativa	Árbol		x		
Mistol del zorro	*Castela coccinea*	Nativa	Árbol		x		
Tala	*Celtis ehrenbergiana*	Nativa	Árbol		x		
Brea	*Cercidium praecox ssp. praecox*	Nativa	Árbol		x		
Piquillin	*Condalia buxifolia*	Nativa	Árbol		x		
Piquillin	*Condalia microphylla*	Nativa	Árbol		x		
Piquillin negro	*Condalia montana*	Nativa	Árbol		x		
Balsamo del campo	*Croton subpannosus*	Nativa	Arbusto		x		
Palo azul	*Cyclolepis genistoides*	Nativa	Arbusto			x	x
Chaguar	*Dyckia floribunda var.*	Nativa	Hierba		x		

Nombre vulgar	*Especie*	Origen	Hábito	Tolerancia anega-miento	Tolerancia sequía	Tolerancia salinidad	Riesgo de invasión
	floribunda						
Pingo pingo	*Ephedra americana*	Nativa	Arbusto		x		
Pito	*Escallonia cordobensis*	Nativa	Árbol	x			
Chilca	*Flourensia campestris*	Nativa	Arbusto		x		
Chilca	*Flourensia oolepis*	Nativa	Arbusto		x		
Fresno	*Fraxinus pennsylvanica ssp. pennsylvanica*	Exótica	Árbol	x			x
Fresno	*Fraxinus americana*	Exótica	Árbol	x			x
Chañar	*Geoffraea decorticans*	Nativa	Árbol	x	x	x	x
Acacia negra	*Gleditsia triacanthos*	Exótica	Árbol	x	x		x
Jumecillo	*Heterostachys ritteriana*	Nativo	Arbusto			x	x
	Holmbergia tweedii	Nativo	Arbusto		x		
Olivillo	*Hyalis argentea*	Nativo	Arbusto		x	x	
Jacaranda	*Jacaranda mimosifolia*	Nativo	Árbol		x		
Alfalfita	*Justicia tweediana*	Nativo	Arbusto		x		
Sacha durazno	*Kageneckia lanceolata*	Nativo	Árbol	x	x		
Camara	*Lantana camara*	Nativo	Arbusto	x	x		x
Jarilla	*Larrea cuneifolia*	Nativo	Arbusto		x		
Jarilla	*Larrea divaricata*	Nativo	Arbusto		x		
Ligustro	*Ligustrum lucidum*	Exótica	Árbol		x		x
Ligustrina	*Ligustrum sinense*	Exótica	Arbusto		x		x
Incayuyo	*Lippia integrifolia*	Nativo	Arbusto			x	
	Lippia salsa	Nativo	Arbusto			x	
Poleo	*Lippia turbinata f. turbinata*	Nativo	Arbusto		x		
Molle	*Lithraea molleoides*	Nativo	Árbol		x		
Matorro negro	*Lycium boerhaviaefolia*	Nativo	Arbusto	x		x	
Talilla	*Lycium cestroides*	Nativo	Arbusto		x		
Piquillin de las víboras	*Lycium chilense var. chilense*	Nativo	Arbusto		x		x
Piquillin de las víboras	*Lycium gilliesianum*	Nativo	Arbusto			x	x
Piquillin de las víboras	*Lycium tenuispinosum var. tenuispinosum*	Nativo	Arbusto			x	x
Toronja	*Maclura pomifera*	Exótica	Árbol	x	x		x
Falso café	*Manihot anisophylla*	Nativo	Árbol		x		
Falso café	*Manihot grahamii*	Nativo	Árbol		x		x
Maitén	*Maytenus boaria*	Nativo	Árbol		x		
Carne gorda	*Maytenus vitis-idaea*	Nativo	Arbusto			x	
Paraiso	*Melia azedarach*	Exótica	Árbol		x		
Lata	*Mimozyganthus carinatus*	Nativo	Árbol		x		
Mora blanca	*Morus alba*	Exótica	Árbol		x		x
Mora negra	*Morus nigra*	Exótica	Árbol		x		x
Abriboca	*Moya spinosa*	Nativo	Árbol		x		
Mato	*Myrcianthes cisplatensis*	Nativo	Árbol		x		
Palan palan	*Nicotiana glauca*	Nativo	Arbusto	x	x		x
Tuna	*Opuntia ficus-indica f. ficus-indica*	Nativo	Hierba	x	x	x	
Cina cina	*Parkinsonia aculeata*	Nativo	Árbol	x	x	x	
Manca potrillo	*Plectrocarpa tetracantha*	Nativo	Árbol		x		
Tacuara	*Phyllostachys aurea*	Exótica	Arbusto	x	x		
Ombú	*Phytolacca dioica*	Nativo	Hierba		x		
Tabaquillo	*Polylepis australis*	Nativo	Árbol		x		
Naranjo trebol	*Poncirus trifoliata*	Exótica	Arbusto		x		
Alamo blanco	*Populus alba*	Exótica	Árbol	x	x		x
Guayacan	*Porlieria microphylla*	Nativo	Árbol		x		
Ñandubay	*Prosopis affinis*	Nativo	Árbol		x		
Algarrobo	*Prosopis alba var. alba*	Nativo	Árbol		x		

Nombre vulgar	***Especie***	**Origen**	**Hábito**	**Tolerancia anega-miento**	**Tolerancia sequía**	**Tolerancia salinidad**	**Riesgo de invasión**
blanco							
Caldén	*Prosopis caldenia*	Nativo	Árbol		x		
Algarrobo dulce	*Prosopis chilensis var. chilensis*	Nativo	Árbol		x	x	
Algarrobo	*Prosopis flexuosa f. flexuosa*	Nativo	Árbol		x	x	
Itin	*Prosopis kuntzei*	Nativo	Árbol		x		
Algarrobo negro	*Prosopis nigra var. nigra*	Nativo	Árbol		x		
Tintitaco	*Prosopis torquata*	Nativo	Árbol		x		
Charcoma	*Proustia cuneifolia var. mendocina*	Nativo	Arbusto		x		
Chaguar	*Puya spathacea*	Nativo	Hierba		x		
Crategus	*Pyracantha angustifolia*	Exótica	Arbusto		x		x
Acacia blanca	*Robinia pseudoacacia*	Exótica	Árbol	x	x	x	x
Zarzamora	*Rubus ulmifolius*	Exótica	Arbusto	x	x		x
Manzano del campo	*Ruprechtia apetala*	Nativo	Árbol		x		
Manzano del campo	*Ruprechtia laxiflora*	Nativo	Árbol		x		
Sauce llorón	*Salix babylonica*	Exótica	Árbol	x			x
Mimbre negro	*Salix fragilis*	Exótica	Árbol	x			x
Sauce criollo	*Salix humboldtiana var. humboldtiana*	Nativo	Árbol	x			x
Mimbre	*Salix viminalis*	Exótica	Árbol	x			x
Salvia	*Salvia cuspidata ssp. gilliesii*	Nativo	Arbusto		x		
Sauco	*Sambucus australis*	Exótica	Arbusto		x		
Curupí	*Sapium haematospermum*	Nativo	Árbol	x			
Quebracho colorado	*Schinopsis lorentzii*	Nativo	Árbol		x		
Quebracho colorado	*Schinopsis marginata*	Nativo	Árbol		x		
Aguaribay	*Schinus areira*	Nativo	Árbol		x	x	
Moradillo	*Schinus fasciculatus var. fasciculatus*	Nativo	Árbol		x	x	
Molle	*Schinus longifolius var. longifolius*	Nativo	Árbol		x	x	
Lecheron	*Sebastiania commersoniana*	Nativo	Arbusto		x		
	Senecio pinnatus var. pinnatus	Nativo	Arbusto		x	x	
Pichanilla	*Senna aphylla*	Nativo	Arbusto		x		
Sen del campo	*Senna corymbosa*	Nativo	Arbusto		x		
Sen del burro	*Senna morongii*	Nativo	Arbusto		x		
Sófora	*Sophora japonica*	Exótica	Árbol	x	x		x
Sófora	*Sophora linearifolia*	Nativo	Arbusto		x		
Espartillo	*Spartina densiflora*	Nativo	Arbusto		x		x
Retama	*Spartium junceum*	Exótica	Arbusto		x		x
Unco	*Sporobolus rigens var. rigens*	Nativo	Hierba		x		x
Vidriera	*Suaeda divaricata*	Nativo	Arbusto			x	x
Palo cruz	*Tabebuia nodosa*	Nativo	Árbol		x		
Pajaro bobo	*Tessaria dodoneifolia ssp. dodoneifolia*	Nativo	Arbusto	x			x
Olmo	*Ulmus pumila*	Exótica	Árbol	x			x
Ancoche	*Vallesia glabra*	Nativo	Arbusto		x		
Pata	*Ximenia americana var. americana*	Nativo	Arbol		xx		
Uña de gato	*Zanthoxylum armatum*	Exótica	Arbusto		x		
Coco	*Zanthoxylum coco*	Nativo	Árbol		x		
Mistol	*Ziziphus mistol*	Nativo	Árbol		x		

Bibliografía

Cantero G., A.; Cantú, M.; Cisneros, J.M.; Cantero, J.J.; Blarasin, M.; Degioanni, A.; González, J.; Becerra, V.; Gil, H.; De Prada, J.; Degiovanni, S.; Cholaky, C.; Villegas, M.; Cabrera, A. y C. Eric. 1998. Las tierras y aguas del sur de Córdoba. Propuestas para un manejo sustentable. Universidad Nacional de Río Cuarto. 119 pp.

Kirby, M.J. y R.P.C. Morgan. 1980. Erosión de Suelos. Ed. Limusa.

Lovell, S.T. y W.C. Sullivan. 2006. Environmental benefits of conservation buffers in the United States: Evidence, promise and open questions. Agriculture, Ecosystems and Environment, 112: 249-260.

Mas, F.M. 2008. Manual de técnicas de restauración fluvial. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento CEDEX. Monografías. 300 pp.

Morgan R.P.C. y R. J. Rickson, 1995. Slope Stabilization and Erosion Control- A Bioengineering Approach. E & FN SPON. Inglaterra. 274 pp.

Styczen, M.E. y R.P.C. Morgan. 1995. Engineering properties of vegetation. En Morgan R.P.C. y R. J. Rickson, 1995. Slope Stabilization and Erosion Control- A Bioengineering Approach. E & FN SPON. Inglaterra.

TRAGSA (Empresa de Transformación Agraria S.A.) 1994. Restauración Hidrológico Forestal de cuencas y Control de la Erosión. Mundi Prensa, España, 885 pp.

USDA-SCS. 1992. Soil bioingeneering for Upland Slope Protection and Erosion Reduction. Engineering Field Handbook. Chapter 18. 53 pp.

Capítulo 8: Teledetección y SIG para el ordenamiento de tierras sujetas a erosión hídrica

8.1. Introducción

A partir de la década del ’60, con la generación del primer Sistema de Información Geográfica (SIG), se produjo un cambio rotundo en el tratamiento, análisis, planificación y gestión del territorio (Comas y Ruiz, 1993). Los mapas en papel o tela que hasta ese momento habían servido para representar la organización de las sociedades y la distribución de los recursos naturales en una región, fueron superados por estas nuevas tecnologías, que a su vez generaron un nuevo enfoque sobre el espacio territorial.

Los SIG tienen como objetivo permitir el manejo de grandes cantidades de datos ambientales referenciados geográficamente y constituyen una tecnología avanzada para los profesionales de la ciencia de la tierra y cualquier estudio o disciplina relacionado con análisis espacial (Meijerink *et al.*,1994).

Myhre *et al.* (1992), definen a un Sistema de Información Geográfica (SIG) como un conjunto de programas y aplicaciones informáticas que permiten la gestión de datos organizados en una base de datos, referenciados espacialmente y que pueden ser visualizados mediante mapas.

Una definición que sintetiza el concepto de SIG es la propuesta por el National Center for Geographics Information and Analysis de los Estados Unidos (NCGIA, 1990), quien sostiene que un SIG es un sistema compuesto de hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar, modelizar y representar datos georreferenciados, con el fin de resolver problemas de gestión y planificación (Figura 8.1).

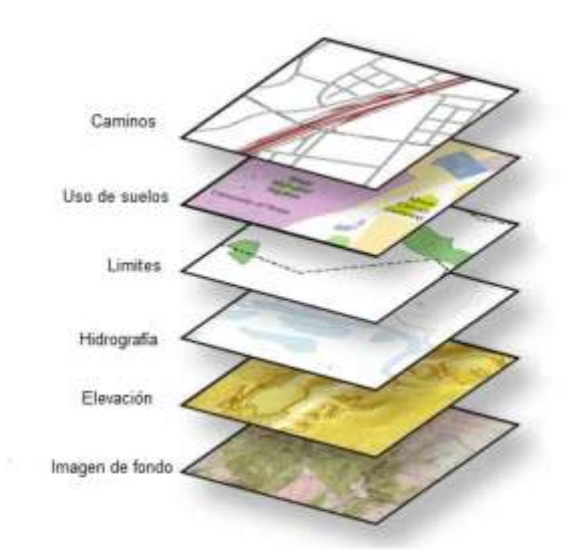


Figura 8.1: Esquema de un SIG (Manual de ArcGIS 9.0. ESRI).

Los elementos que componen un SIG son: hardware, software, datos, sistema de representación y procedimientos (Maguire, 1991, Figura 8.2).

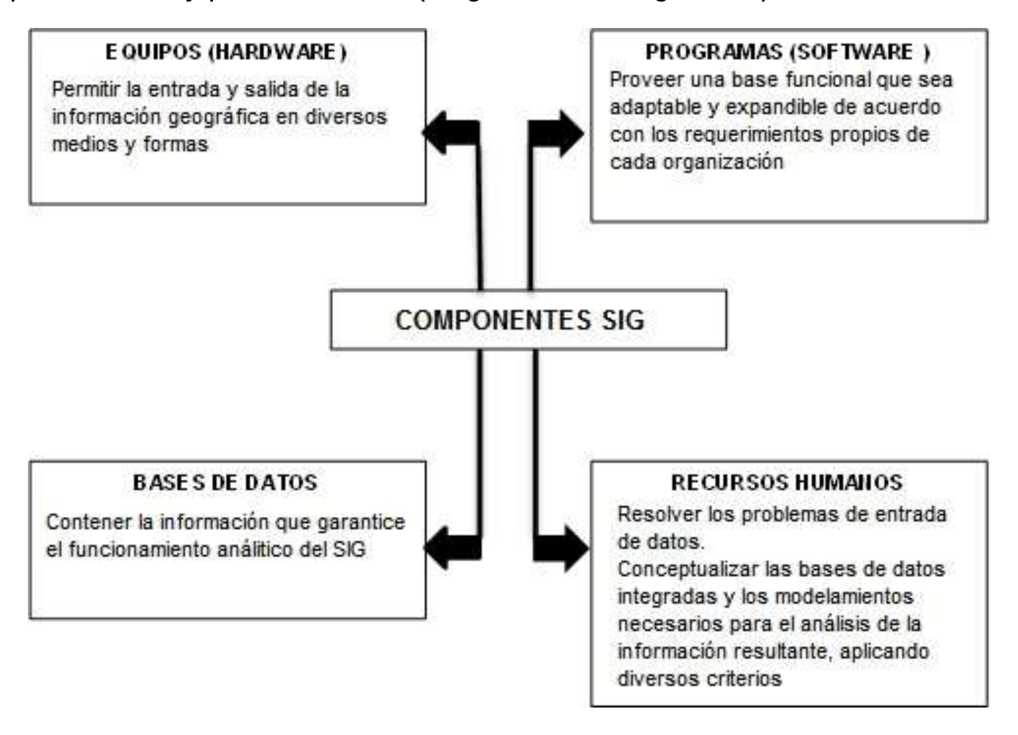


Figura 8.2: Componentes de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (adaptado de Maguire, 1991).

El hardware es el soporte material y está compuesto por una Unidad Central de procesamiento y dispositivos de entrada de datos, de salida de información, de almacenamiento y de visualización. El software es el soporte lógico que organiza, dirige y da consistencia a todo el sistema.

El dato es el elemento crucial de un SIG. Lograr un conjunto de datos operativos para un SIG puede abarcar un 70% del costo total del proyecto.

El procedimiento está representado por las personas encargadas del diseño, implementación y uso del SIG.

El sistema de representación permite mostrar la mayoría de las entidades gráficas típicas de la cartografía automática, tales como líneas, puntos, símbolos, tramas e imágenes, referenciadas mediante coordenadas geográficas o cartesianas.

Myhre *et al.* (1992), sostienen que es necesario, cuando se habla de SIG, hacer la diferencia entre la parte que corresponde al software y lo que corresponde al "concepto SIG", es decir, el software puede variar dependiendo de quién lo produce, sin embargo, en cuanto al concepto se refiere, los módulos básicos que deben manejarse son:

- Una base de datos que permita gestionar los datos alfanuméricos y espaciales, ya sea en forma separada o en conjunto, con una organización de los datos que posibilite relaciones espaciales, conocidas como relaciones topológicas (proximidad, conectividad, contigüidad y vecindad).

- Sistema de acceso selectivo a la base de datos que permita consultas y simulaciones con los datos, tanto gráficos como alfanuméricos, por ejemplo un lenguaje SQL (Sequencial Query Languaje, ESRI, 1994) , IML (Idrisi Macro Languaje, Eastman, 1997).

- Sistema de despliegue cartográfico que permita a través de la selección de algunos elementos de la base de datos producir como salida un mapa temático (p.e. de vegetación, de suelos, de altitud del terreno).

- Sistema de digitalización de mapas, que permita convertir un mapa producido en formato papel o hard copy y llevarlo a un formato digital y que sea aceptado por el computador, pudiéndose editar dicho producto.

- Sistema de procesamiento de imágenes que permita, mediante una serie de funciones y algoritmos matemáticos, conocidos como procedimientos de clasificación, respecto de la información que se encuentra en las imágenes producidas por sensores remotos tales como Landsat o Spot. Es decir, que permita tomar una imagen de satélite sin procesar o con un preprocesamiento básico, y mediante una serie de procedimientos de clasificación de la imagen conseguir un mejoramiento de la información contenida en la imagen, según el propósito perseguido.

- Sistema de análisis estadístico, en general se refiere a ciertas rutinas especializadas orientadas hacia los datos de tipo espacial.

- Sistema de importación y exportación de datos y su organización a ficheros estándar de intercambio de datos.

8.2. Los datos geográficos y su representación digital

Un sistema de información geográfica es un mecanismo informático para manejar datos, con el objeto de facilitar el entendimiento de los fenómenos espaciales (Bosque Sendra *et al.*, 1994), por tal motivo, es necesario conocer qué es un dato geográfico.

Es conveniente diferenciar conceptualmente lo que significa datos e información. El dato es la representación concreta de un objeto y constituye el antecedente necesario para el conocimiento de un fenómeno espacial. Un conjunto de datos organizados y normatizados (Date, 1986) forman una base de datos, que es el paso previo para obtener información con una finalidad determinada. La información se obtiene luego del procesamiento de los datos.

Los datos geográficos tienen tres componentes: una espacial (localización), una componente temática (atributos) y una temporal (tiempo) (Meijerink *et al.*, 1994).

8.2.1. Componente espacial

Este componente hace referencia a la localización geográfica y a las propiedades espaciales de los datos y a las relaciones espaciales que existen entre ellos. La componente espacial responde bien a la cuestión ¿dónde está localizado el dato geográfico? (Comas y Ruiz, 1993).

La localización geográfica se expresa mediante un sistema de coordenadas, que debe ser el mismo para las distintas capas o estratos de información con los que se representa el área de estudio.

Para localizar un dato si este corresponde a una celda o punto se realiza a través de un par de coordenadas (latitud y longitud o X e Y), si es una línea a partir de las coordenadas de los puntos que la definen y si es un polígono por medio de las coordenadas que definen las líneas que lo cierran. Las celdas en una malla regular se localizan mediante su número de fila y de columna. De esta forma, los objetos espaciales con los que se representa la variación que se produce en el mundo real, están georreferenciados según un sistema de proyección (Aronoff, 1989, Puebla y Gould, 1994).

Los elementos geométricos con que se representa la realidad tienen propiedades espaciales de acuerdo con su naturaleza. Entre las propiedades espaciales de las líneas figuran la longitud, la forma, la pendiente, la orientación, la sinuosidad, etc. En el caso de los polígonos se pueden identificar la superficie, el perímetro, la forma y el índice de compacidad. En el caso de las celdas que son de igual tamaño y forma, se constituyen conjuntos de celdas (que habitualmente reciben el nombre de zonas) que pueden ser tratados como si fueran polígonos a efecto del análisis de sus propiedades espaciales (Aronoff, 1989, Puebla y Gould, 1994).

Los datos mantienen relaciones espaciales entre sí, que pueden ser:

- Relaciones geométricas: calculadas a partir de las coordenadas de localización de los objetos: distancia, superficie, orientación.

- Relaciones topológicas: expresan las relaciones entre objetos de forma cualitativa (p.e. si dos polígonos son colindantes (contigüidad), si uno está contenido en el otro (inclusión) o si dos líneas están conectadas (conectividad).

8.2.2. Componente temática

Esta componente responde a la pregunta ¿Qué es el dato geográfico? y registra las características descriptivas de los elementos geográficos. Estas características se conocen como atributos o variables. Así, cada elemento registra un determinado valor, un dato para cada uno de los atributos considerados. Las variables que constituyen la información temática de las unidades espaciales pueden ser de distinto tipo y estar medidas en distintas escalas.

Según las funciones que cumplen, existen diversos tipos de variables,:

- Variables continuas: pueden tomar cualquier valor entre dos valores dados, por tanto se cuantifican mediante números reales (p.e. altitud, superficie, pendiente, longitud y densidad).

- Variables discretas: los valores son sólo números enteros (p.e. individuos, unidades indivisas tales como subcuencas, lotes o establecimientos).

Las variables pueden medirse usando distintos tipos de escalas: escala nominal, escala ordinal y escala de intervalo.

- Escala nominal: establece simplemente una diferenciación o clasificación de las unidades espaciales en categorías o clases. No se asignan valores numéricos sino nominales, es decir nombres (distritos políticos, ciudades, suelos, ríos, cuencas, otros). Las unidades espaciales pueden agruparse o pertenecer sólo a una categoría superior (p.e. la ciudad de Río Cuarto y la cuenca Arroyo La Tapa pertenecen al Departamento Río Cuarto) (Meijerink *et al.*, 1994).

Un caso especial en la escala nominal lo constituyen las variables dicotómicas, en las que sólo se admiten dos posibilidades: presencia o ausencia. A partir de esta escala de medida surgen los Mapas Binarios (Puebla y Gould, 1994).

Las variables que utilizan este tipo de escala nominal reciben el nombre de cualitativas, ya que en este caso sólo se especifica la pertenencia a una categoría mediante una etiqueta o carácter no numérico.

- Escala ordinal: también se establece una diferenciación o clasificación como en las variables nominales, pero se le asigna un orden jerárquico entre las distintas unidades espaciales. Esto ocurre siempre que aparece un "ranking". (p.e. jerarquización de subcuencas por número de cárcavas activas, número de surcos de erosión por lote).

- Escala de intervalo: no sólo establece una diferenciación y jerarquización, sino que además indica la distancia que existe entre las distintas unidades espaciales. Para medir esa distancia es necesario establecer una escala o rango o intervalo sobre la que cada unidad espacial debe registrar un valor (p.e. clasificar las subcuencas en función de su pendiente en intervalos de 0-3%, 3-8% y >8%). Las variables que pueden ser representadas en intervalo se denominan cuantitativas por llevar asociado un valor numérico.

8.2.3. Componente temporal

El tiempo juega un papel fundamental en la geografía, ya que el mundo real sólo puede ser explicado a partir de procesos espacio-temporales (Puebla y Gould, 1994).

Los elementos geográficos georeferenciados y sus atributos se modifican en función del tiempo, esta característica diferencia la geometría de la geografía, en la cual el espacio está unido indivisiblemente al tiempo (Parkes y Thrift, 1980, citado por Puebla y Gould, 1994) (p.e. el avance anual de cárcava requiere de la información sobre las dimensiones de la cárcava a lo largo de una serie de años). Esta componente en sí misma no es un dato, sino que se trata de una información adicional directamente vinculada o relacionada con un objeto del mundo real o con alguna característica asociada al mismo (Calvo, 1993). El dato temporal puede ser descripto en términos de: duración, resolución y frecuencia (Meijerink *et al.*, 1994). La duración hace referencia al tiempo real de la base de datos (p.e. registro de lluvias en un año, serie histórica de 20 años de lluvias), la resolución se refiere a la discretización del tiempo en intervalos (p.e. lluvia cada 5 minutos o lluvia cada 1 hora) y la frecuencia al número de observaciones almacenadas y observadas (p.e. cantidad de lluvia en un intervalo de tiempo).

8.3. Modelos espaciales y estructuras de datos

Existen varias opciones para representar y organizar los datos geográficos, pero antes es necesario conocer algunos principios, formalismos y modelos espaciales que se agrupan a partir de las potencialidades que brindan los software disponibles en el mercado (Comas y Ruiz, 1993).

Es importante definir con exactitud qué elemento gráfico (punto, línea o polígono) representará mejor la realidad (p.e. una cárcava puede ser representada por un punto, una línea o un polígono, ello dependerá de la escala de trabajo; una ciudad puede ser representada por un punto o un polígono).

Al iniciar un proyecto SIG es importante realizar una serie de modelos que permitan representar en una computadora el mundo real. Este esquema, normalmente se lleva a cabo en tres etapas para pasar de la realidad a un primer modelo llamado conceptual, luego se avanza hacia un modelo lógico y se termina en un modelo físico (Figura. 8.3).

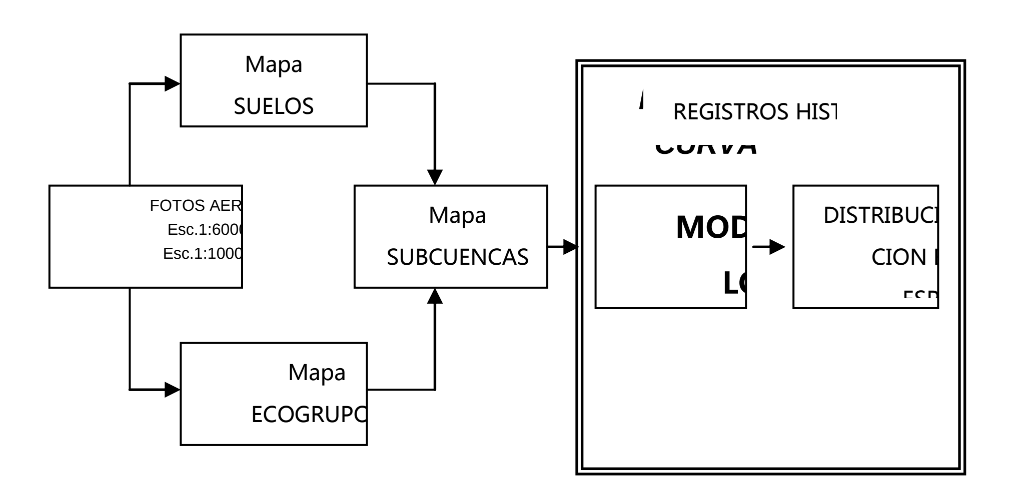


Figura 8.3: Proceso de representación del territorio en un SIG (Comas y Ruiz, 1993).

Este proceso comienza con la definición de los objetivos del trabajo según la visión que se tenga de la realidad (Comas y Ruiz, 1993), posteriormente se continúa con la realización del modelo conceptual que representa la realidad, a partir de la definición de las entidades de la superficie terrestre con sus relaciones espaciales y atributos, representándose en un esquema que describe los fenómenos del mundo real. Este modelo conceptual necesita como primer paso análisis de los datos que se utilizarán, nivel de percepción o unidad de observación, fuentes y metodologías para obtenerlos y calidad de los datos.

En un segundo paso y a partir de los datos, se definen las entidades (p.e. en un SIG aplicado al ordenamiento de una cuenca, algunas de las entidades serían, suelos, fisiografía, precipitaciones, establecimientos rurales, red de drenaje, focos de erosión, tenencia de la tierra) y sus relaciones espaciales con las otras entidades definidas (p.e. relación entre tipos de suelo y focos de erosión, mapa de gradientes de pendiente y prácticas culturales).

Existen diversos métodos para desarrollar el modelo conceptual, uno de ellos es, el *modelo Entidad-Relación* que garantiza la organización de todas las entidades con sus relaciones en un solo esquema que representa las cosas como son en la realidad. En el ítem Bases de datos se verá con más detalle.

El modelo lógico es la digitalización del modelo conceptual. De una buena ejecución del modelo conceptual y lógico, que son totalmente independientes del software y hardware a utilizar, dependerá el éxito del SIG.

A continuación se muestra un modelo conceptual de la utilización de un SIG en la modelación hidrológica de una cuenca serrana del centro-sur de la provincia de Córdoba, (González, *et al.* 2002). En dicho modelo se definen las entidades y los procedimientos informáticos para obtener a partir de los datos, la información para ingresar al modelo hidrológico (Figura 8.4).

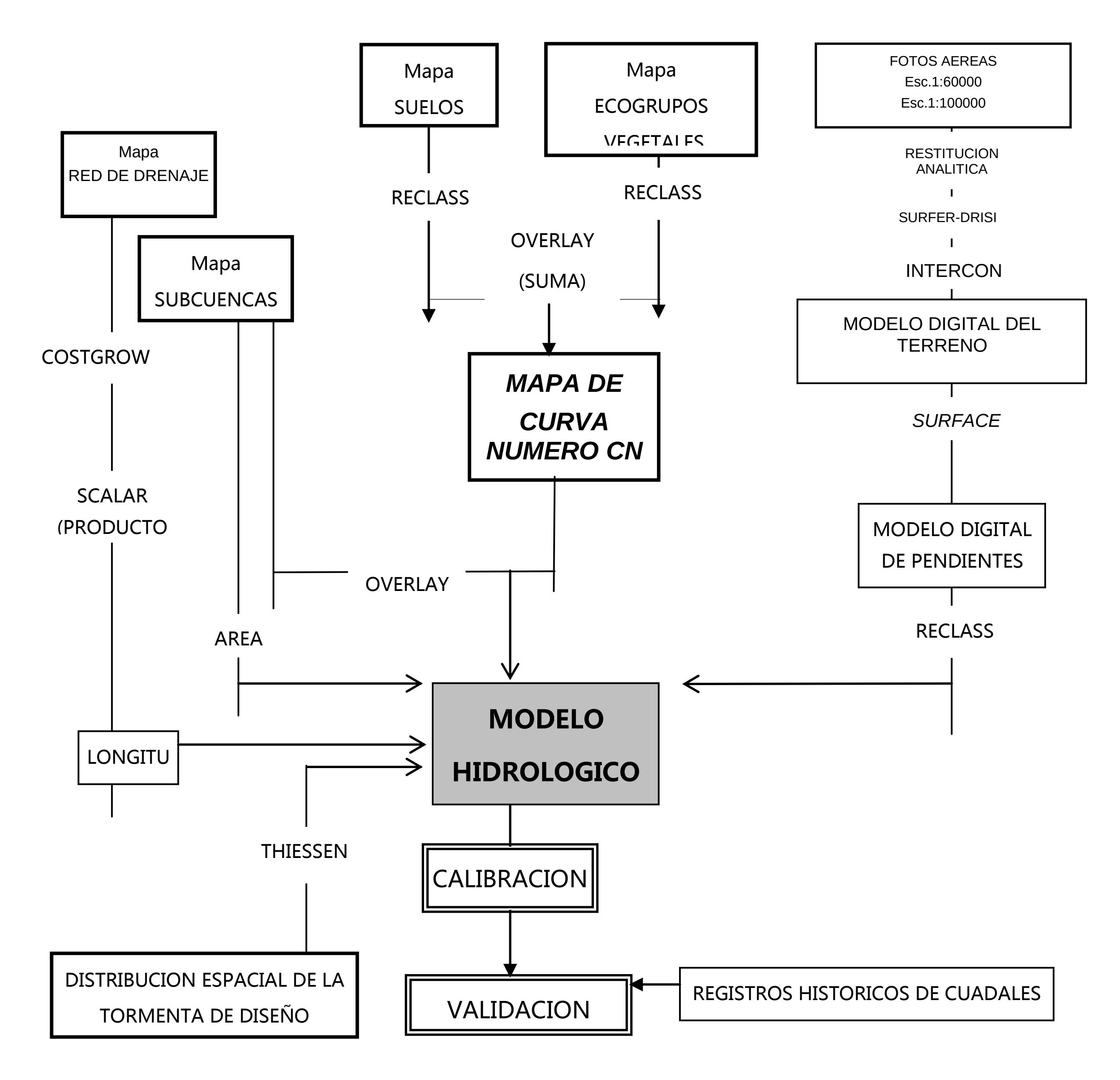


Figura 8.4: Modelo conceptual de un SIG orientado a la modelación hidrológica. (Gonzalez *et al.*, 2002)

En el modelo físico, se traduce y organiza el modelo lógico en bytes, se organizan los datos en los soportes de hardware de almacenamiento con las potencialidades ofrecidas por el software. Esta área del conocimiento corresponde a los informáticos.

8.3.1. Principales modelos de representación digital de los datos

Los modelos de representación digital de los datos geográficos más usuales son el Vectorial y el Raster (Figura 8.5).

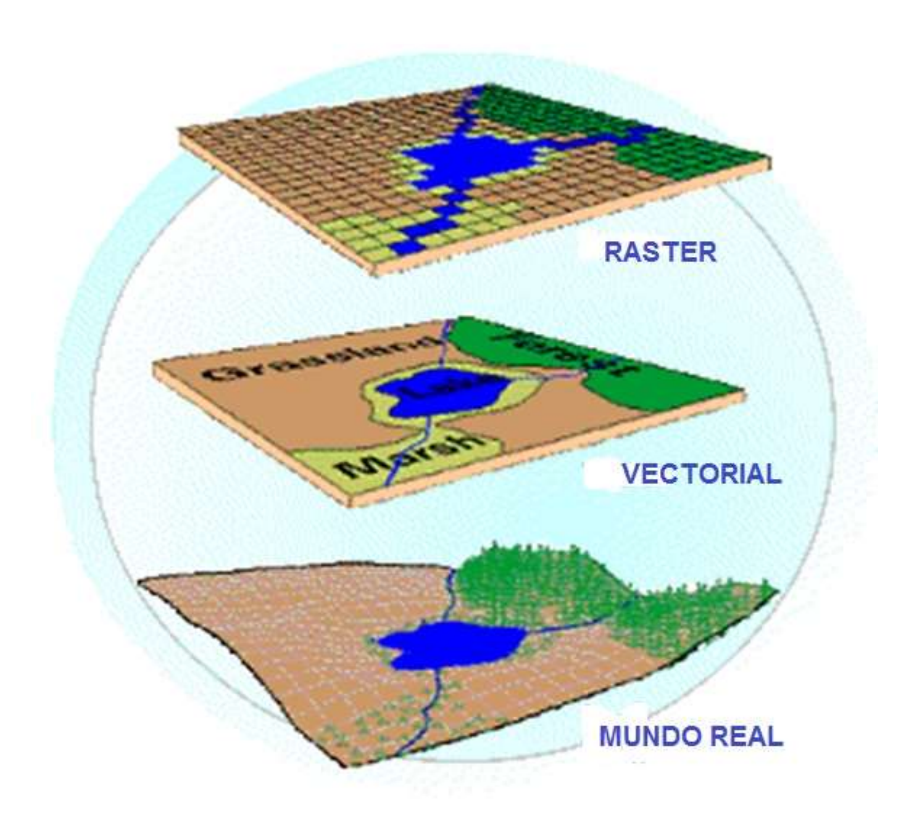


Figura 8.5: Modelos de representación de datos de un SIG. (Manual de ArcGIS 9.0. ESRI).

Modelo Vectorial

El foco de interés se sitúa en las entidades geográficas y en su posicionamiento sobre el espacio. Para modelizar las entidades del mundo real se utilizan tres tipos de objetos espaciales: puntos, líneas y polígonos (Bosque Sendra, 1994, Figura 8.6.).

Los puntos son objetos espaciales de 0 (cero) dimensiones (0 D): tienen una localización en el espacio, pero no tienen longitud ni ancho. Se puede representar mediante puntos cualquier objeto geográfico cuyas dimensiones sean despreciables desde una perspectiva cartográfica tales como casas rurales o puestos, estaciones meteorológicas y estaciones de aforos.

Las líneas son objetos espaciales de una dimensión (1D), ya que tienen longitud, pero no ancho. Las líneas están definidas mediante una sucesión de puntos. Habitualmente se representan mediante líneas elementos que se integran en redes, ya sean naturales (como las redes hidrográficas) o artificiales (como las rutas o alambrados).

Los polígonos son objetos espaciales de dos dimensiones (2 D), ya que tienen longitud y ancho. Se representan mediante una sucesión de líneas que cierran (un anillo). Las unidades homogéneas de tierra y las subcuencas de una cuenca mayor son ejemplos para este tipo de representación.

En el caso de este modelo la escala juega un papel importante, ya que una casa rural, puede ser representada como un punto en un mapa a escala 1:50.000; un polígono a escala 1:5000 o un conjunto de polígonos a escala 1:500.

Modelo Raster

En este caso los individuos geográficos se representan en función de un criterio locacional y temático. El espacio es dividido en porciones de igual tamaño y forma mediante la superposición de una retícula regular y a continuación se registran las propiedades de esas porciones del espacio, habitualmente en capas distintas. La retícula o grilla suele ser de unidades cuadradas de manera que cada una de las celdas represente una pequeña porción del espacio. Así pues, el modelo raster propone una aproximación basada en objetos elementales (celdas), que pueden agruparse para constituir objetos complejos que representan elementos del mundo real (Puebla y Gould, 1994) (Figura 8.6).

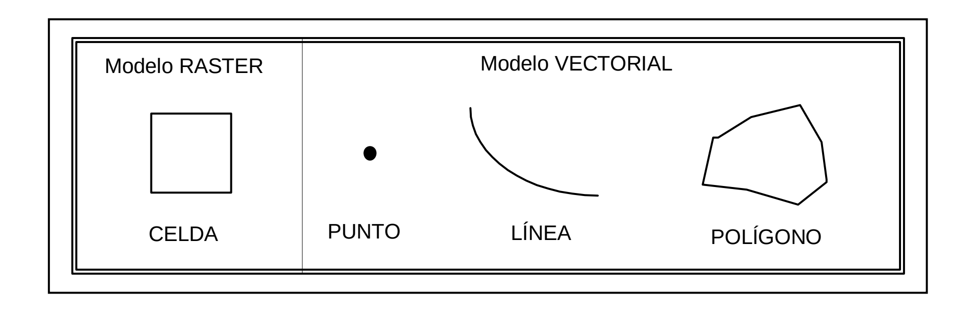


Figura 8.6: Representación raster y vectorial de la información territorial (Puebla y Gould, 1994).

8.4. Síntesis de las funciones de los SIG

Las funciones de los SIG se pueden reunir en cuatro grupos (Myhre *et al.* 1992),

8.4.1. Funciones de entrada de información

Estas funciones son aquellas que nos permiten capturar los datos, depurarlos y organizarlos de tal forma que se creen relaciones topológicas entre las entidades geométricas que los soportan.

Myhre *et al.* (1992), sostienen que estas funciones son: digitalización, filtrado de líneas, transformación de coordenadas, localización y edición de errores, georreferenciación, gestión de tablas, borrado selectivo, creación de topologías, conversión de formatos, rasterización y vectorización, procesamiento digital de imágenes satelitales y corte-unión de redes de polígonos y arcos.

8.4.2. Funciones de gestión de datos

El gestor de la base de datos, junto con el sistema gráfico, son la parte más importante de los SIG (Valenzuela, 1994). Las bases de datos se organizan en tablas, formadas por registros, y estos, están divididos en campos (Myhre *et al.* 1992),). El gestor tiene por objetivos el almacenamiento y recuperación de los datos de la base de datos y dentro de las funciones más importantes se pueden citar: localización de uno o varios datos mediante técnicas SQL (Secuencial Query Language), creación y modificación de la estructura de una tabla, indexado de las tablas, relación entre tablas y de unión lateral, añadir registros procedentes de otra tabla, exportación e importación a ASCII, borrado de registros y empaquetado y actualización de columnas.

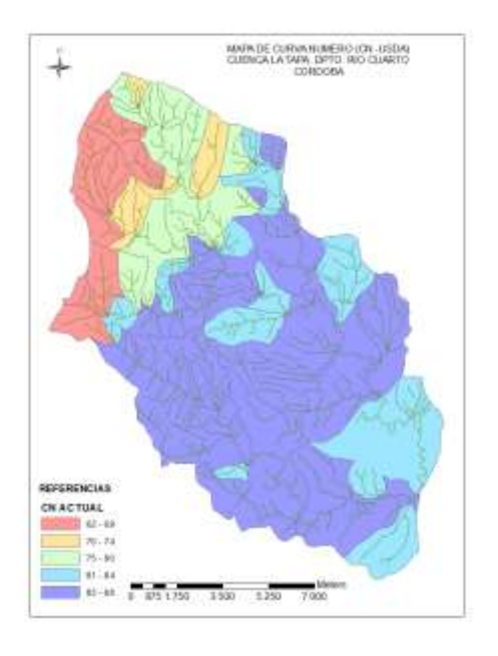
8.4.3. Funciones de Transformación y análisis de datos

En esta función es donde los datos se transforman en información. Dentro de las funciones más representativas del análisis espacial se pueden citar: análisis de área de influencia (buffer), de superposición de polígonos, de creación de mapas temáticos, de localización y selección de entidades (Inclusión y proximidad), de agrupamiento y clasificación y distribución espacial (Moldes, 1995).

8.4.4. Funciones de salida de datos

Existen diversas formas de salida de datos, las cuales dependerán de los objetivos del trabajo y disponibilidad tecnológica y económica de los usuarios. Las más frecuentes son mapas analógicos, tablas de valores, gráficos, representaciones tridimensionales y simulaciones de vuelo de una cierta zona en estudio.

La Figura 8.7 muestra un mapa de CN (USDA) y un mapa de Ecogrupos Vegetales de la Cuenca Arroyo La Tapa.



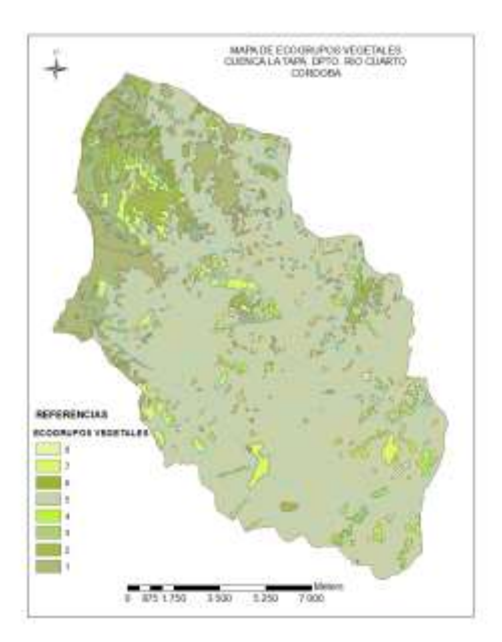


Figura 8.7: Mapa de Curva Número y Ecogrupos Vegetales, Cuenca La Tapa. Dpto. Río Cuarto. (Gonzalez *et al.*, 2002).

8.5. Bases de datos y SIG

Los SIG vectoriales son los que mejor representan la unión SIG-Bases de Datos, porque la parte espacial de los SIG está conectada a un sistema de gestión de base de datos (DBMS, *Data Base Management Systems*) de los datos temáticos. Este consiste, en una colección de datos interrelacionados y un conjunto de programas para acceder a estos datos (Date, 1986).

El objetivo primordial de un DBMS es proporcionar un entorno que sea a la vez conveniente y eficiente para ser utilizado al extraer y almacenar información de la base de datos, mientras que una base de datos se puede definir como "una colección de uno o más ficheros de datos, almacenados en una forma estructurada y que contienen

información no-redundante, de modo que las relaciones que existen entre los distintos ítems o conjuntos de datos puedan ser utilizados por el sistema de gestión (DBMS) para manipular o recuperar los mismos (Date, 1986).

En la organización de cualquier base de datos es necesario reconocer los distintos niveles de abstracción que existe en dicha organización, estos niveles son:

- Nivel físico: Es el nivel más bajo de abstracción que describe cómo se almacenan realmente los datos. La información se encuentra en soporte magnético, él cual a su vez trabaja con unidades como BIT y BYTE según los protocolos utilizados. Esta visión es mejor entendida por los ingenieros eléctricos y electrónicos en general;

- Nivel conceptual: el cual es un nivel un poco más alto (desde la perspectiva del usuario) que el nivel físico, en el adquiere importancia el significado de los arreglos de BIT y BYTE en cuanto a lo que significan como información, en otras palabras, el nivel conceptual lo utilizan los administradores de los sistemas de información para establecer qué datos son realmente almacenados en la base de datos y las relaciones que existen entre ellos;

- Nivel de visión: Este nivel se considera el más alto en esta escala y se ocupa del manejo de la información que tiene significado para un determinado usuario en el sentido de sus necesidades específicas. Un ejemplo típico de un nivel de visión es un listado, ya sea visto en la pantalla de un monitor o en una hoja de papel manejada por una impresora, con aquellos datos que han sido extraídos de un gran conjunto de datos y que son presentados en dicho listado obedeciendo a un requerimiento de un determinado usuario.

La interrelación entre estos tres niveles de abstracción se ilustra en la Figura 8.8.

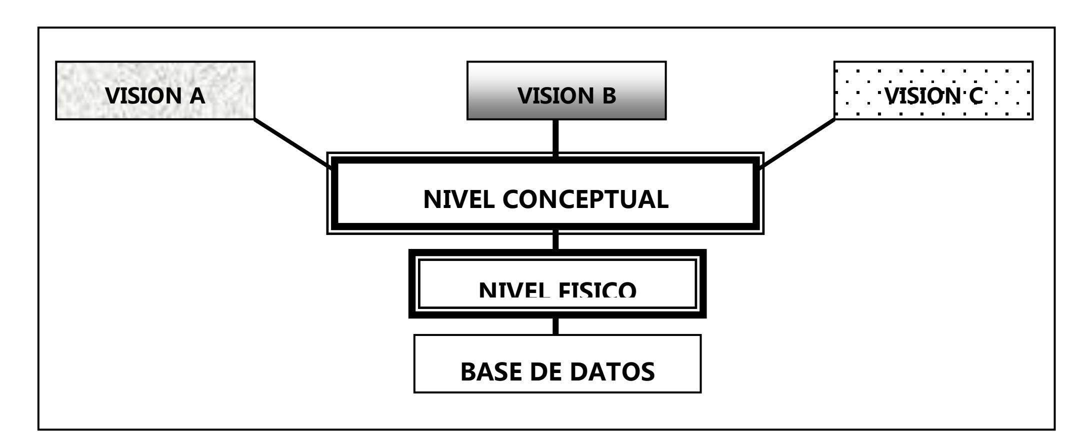


Figura 8.8: Los tres niveles de abstracción de datos.

8.5.1. Diseño de base de datos

Para evitar problemas futuros en el manejo de los datos, es necesario tener un diseño estructurado de las bases de datos. Los procesos de diseño de base de datos pueden ser divididos en dos fases: diseño lógico y diseño físico.

El diseño lógico, es la integración de todos los requerimientos de la aplicación de una estructura de bases de datos que soporta las vistas y necesidades de procesamiento de estas aplicaciones.

El diseño físico, se refiere a la evaluación de alternativas de implementación y selección de estructuras de almacenamiento, mecanismos de búsqueda de datos y métodos de acceso.

El diseño de la base de datos tiene como objetivos desarrollar su estructura, definir contenidos, especificar las limitaciones a las que los datos están sujetos, evitar redundancia e inconsistencia de los datos; dificultad en el acceso, que la información sea manipulada por usuarios no autorizados, entre otros aspectos.

El proceso del diseño de la base de datos involucra:

- La recolección de requerimientos y análisis;
- La interpretación de las necesidades de los usuarios y el desarrollo de un esquema conceptual;
- El mapeo del esquema conceptual en el modelo de datos del sistema de manejador de base de datos;
- La especificación de las estructuras de almacenamiento y directorios; y,
- La implementación de la base de datos.

El mundo real que es modelado puede ser visto de tres formas diferentes: como es en realidad, como es percibido por los humanos y a través de datos que caracterizan esa realidad. Es ésta caracterización la que se almacena en la base de datos y es manejada por los programas de aplicación.

8.5.2. Modelo de datos Entidad-Relación

El modelo Entidad –Relación (E-R) es una herramienta conceptual que permite, mediante una percepción del mundo real, representarlo a través de una *técnica de diagramación.* Valenzuela (1994), propuso una técnica semántica y gráfica para representar las entidades y sus relaciones según como se manifiestan en el mundo real.

El modelo presume que el mundo real consta de un conjunto de objetos, conceptos o actividades llamados entidades y de relaciones entre ellos.

Además de entidades y relaciones, el modelo permite establecer la cardinalidad de mapeo, que expresa el número de entidades con las que puede asociarse otra entidad por medio de un conjunto de relaciones.

La estructura lógica de una base de datos puede expresarse gráficamente por medio de un Diagrama E-R (Figura 8.9), que consta de los siguientes componentes:

- RECTÁNGULOS, que representan conjuntos de entidades.
- ELIPSES, que representan atributos.
- ROMBOS, que representan relaciones entre conjuntos de entidades.

- LÍNEAS, que conectan los atributos a los conjuntos de entidades y los conjuntos de entidades a las relaciones.

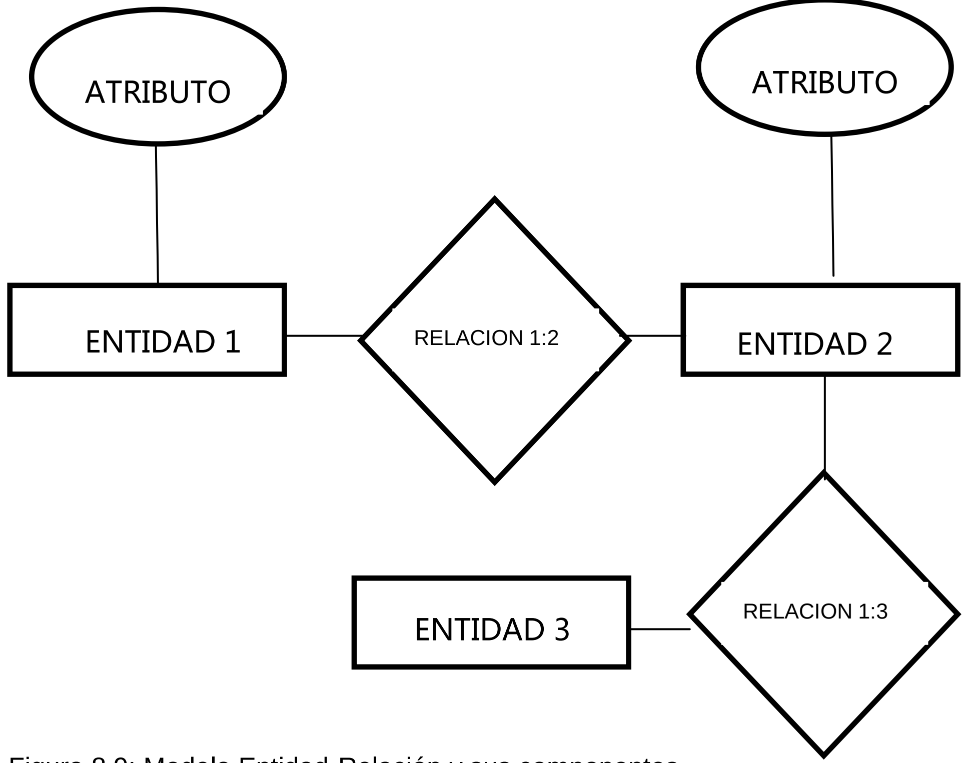


Figura 8.9: Modelo Entidad-Relación y sus componentes.

A continuación se definen algunos componentes de una base de datos:

- Entidades

Una entidad es un objeto identificable, concepto o actividad personal de determinado sistema natural o artificial que puede ser descripto en función de sus características y relaciones con otras entidades.

Las entidades pueden dividirse en regulares y débiles. Una entidad regular es aquella que existe por sí misma y no depende su existencia de otra entidad (p.e. ríos, vegetación, suelo, gradiente de la pendiente).

Una entidad débil es aquella cuya existencia depende de otra entidad, es decir, no puede existir si no existe una entidad regular (p.e. avance de una cabecera de cárcava en relación a a la ocurrencia de precipitaciones erosivas y al manejo de las tierras que aportan agua a ella).

- Atributos

Las entidades tienen propiedades y se conocen con el nombre de atributos. Estas propiedades son las que caracterizan a la entidad (p.e. la entidad suelos, tiene como atributos el nombre taxonómico, una expresión areal, un contenido de materia orgánica, estabilidad estructural en superfcie, densidad aparente, resistencia mecánica, entre otros).

Dentro de los atributos existe uno que tiene que ser un identificador único o clave que pertenece sólo a esa entidad. Este concepto es muy importante en el diseño de la base de datos, ya que este identificador único es el que permite unir (*join*) los atributos con los datos espaciales (p.e. en la entidad suelo el código que se le da al nombre de le da a la unidad taxonómica; en el caso de la entidad "propietarios de establecimientos", la clave puede ser su número de documento o su clave única de ingreso tributaria).

- Relación

En el mundo real, las entidades funcionan a partir de relaciones que existen entre ellas, una relación marca hasta qué punto existe una vinculación entre las entidades.

Una relación debe responder a dos propiedades fundamentales: la opcionalidad y la cardinalidad.

La *opcionalidad*, define si una entidad *debe* o *puede* estar relacionada con otra (p.e. la entidad focos de erosión en una subcuenca no se relaciona con la entidad rinde de los cultivos pero si se relaciona con la dirección de las líneas de siembra de los mismos).

La *cardinalidad*, muestra el grado de la relación que puede ser a UNO (1) o A MUCHOS (M). (p.e. una subcuenca que pertenece a una cuenca mayor y esta puede tener muchas subcuencas, se fija la cardinalidad de la relación y se dice que ésta es 1 a M).

Las relaciones espaciales pueden ser de tres tipos:

- relación de una entidad con otra entidad solamente (una subcuenca pertenece a una sola cuenca y se representa gráficamente 1 a 1);
- una entidad que está relacionada con varias entidades (un río pertenece a varias subcuencas y se representa gráficamente 1 a M), y
- una entidad tiene relaciones con varias entidades y estas con otras entidades (un río puede pertenecer a varias subcuencas y una subcuenca puede tener varios ríos y se representa gráficamente M a M).

En una etapa posterior, el modelo debe ser ajustado para eliminar relaciones de M a M y las redundancias que se estén presentando. Cuando un río puede pertenecer a varias subcuencas y una subcuenca puede tener varios ríos, esta situación no es manejable en el computador y por lo tanto, es necesario dividirla creando una entidad que represente la relación entre ellas, siendo esta nueva entidad la unión de las dos entidades involucradas.

En resumen, el modelo entidad-relación, se basa en la percepción de un mundo real que consiste en un conjunto de objetos básicos llamados entidades y relaciones entre estos objetos.

8.6. Coordenadas geográficas

Sobre la tierra es muy sencillo trazar una serie de anillos imaginarios, paralelos al Ecuador, llamados paralelos y una serie de círculos perpendiculares a los mismos que convergen en los polos, llamados meridianos. Estos anillos, las coordenadas geográficas, son el sistema universal para la localización de puntos sobre la superficie terrestre (Figura 8.10).

Las distancias se expresan con unidades de medida angular, es decir grados, minutos y segundos. En cualquier punto de la tierra la distancia cubierta por un grado es aproximadamente 111 kilómetros.

Longitud: distancia que hay entre un punto terrestre al Este u Oeste del Primer Meridiano (fijado arbitrariamente en Greenwich, Inglaterra). Varia entre –180° al Este +180° al Oeste.

Latitud: distancia que hay entre un punto terrestre al Norte o Sur del Ecuador. Oscila entre 90° Norte y -90° Sur. La Figura 8.10 representa la posición de un punto en la superficie terrestre.

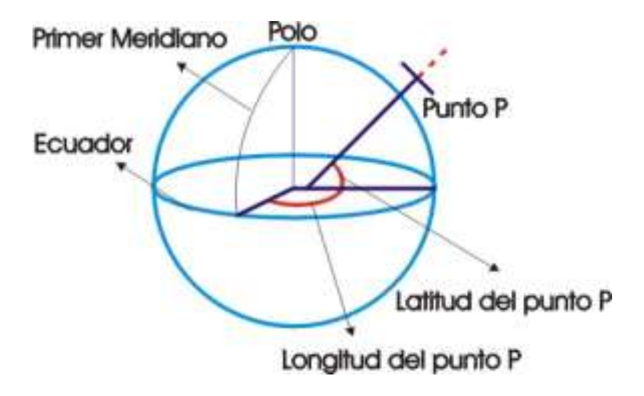


Figura 8.10: Esquema de las coordenadas de posición (Degioanni, 2001).

Utilizando este sistema de coordenadas cualquier punto puede ser localizado. Por ejemplo, el Obelisco de la ciudad de Buenos Aires puede ser ubicado conociendo su latitud y longitud, en este caso 34° 36’ 13.85’’ S; 58° 22’ 53,58’’ W . La letra S indica que está al sur del Ecuador y la letra W que está al oeste del meridiano de Greenwich (Figura 8.11).



Figura 8.11: Posición geográfica del Obelisco, Ciudad de Buenos Aires (Google Earth,© 2011).

8.6.1. Proyecciones del sistema de coordenadas geográficas

Cuando se quiere representar en un plano sectores de la superficie terrestre es necesario adoptar un modelo matemático que permita pasar los puntos de la superficie terrestre al plano. Dicho modelo recibe el nombre de Sistema de Proyección Cartográfico.

El Sistema de Proyección Cartográfico de un mapa es una transformación matemática de la superficie de la tierra, la cual es curva, a un plano de dos dimensiones a partir del apoyo de un elipsoide. Para aplicar dicha transformación, primero se debe definir un elipsoide que es una superficie de referencia geométrica regular en el cual las secciones del plano son elipses o círculos que incorporan las deformaciones del geoide. Este modelo matemático -elipsoide- es el que más se asemeja al geoide y representa lo más acabadamente posible la superficie de la Tierra. Al elipsoide también se lo denomina Datum. Existen varios elipsoides de referencia. En Argentina se utilizaba el Datum Campo Inchauspe (que sobre el mismo se ha georreferenciado la cartografía topográfica) y actualmente se utiliza el Datum WGS84.

De acuerdo al tipo de superficie proyectada los principales tipos de proyecciones son:

- Azimutal: la superficie utilizada es un plano, el cual toca la esfera en un punto (Figura 8.12-1).
- Cilíndrica: la superficie utilizada es un cilindro imaginario que toca la esfera en un círculo mayor. Consiste en envolver a la esfera terrestre con un cilindro tangente a un círculo máximo (p.e. el Ecuador o alguno de los meridianos, en este caso es transversal). Los planos resultantes de la proyección de los meridianos son rectas equidistantes y de los paralelos perpendiculares a los meridianos (Figura 8.12-2).
- Cónica: la superficie utilizada es un cono tangente a la esfera en un círculo menor (un círculo cuyo plano no pasa a través del centro de la esfera, Figura 8.12-3).

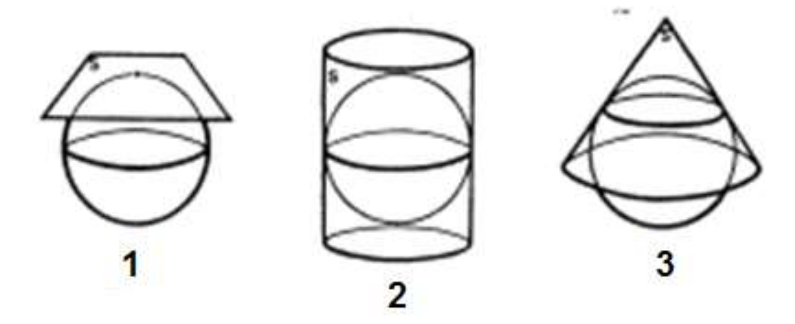


Figura 8.12: Tipos de proyección de coordenadas geográficas (*Degioanni,2001).*

El plano resultante de la proyección está representado por una cuadricula de líneas rectas. La unidad de medida está establecida en el sistema métrico decimal y se utiliza para localización de puntos, establecer rumbos y cálculos de ángulos, distancias y áreas. La figura 8.13 esquematiza el desarrollo de una proyección cilíndrica.

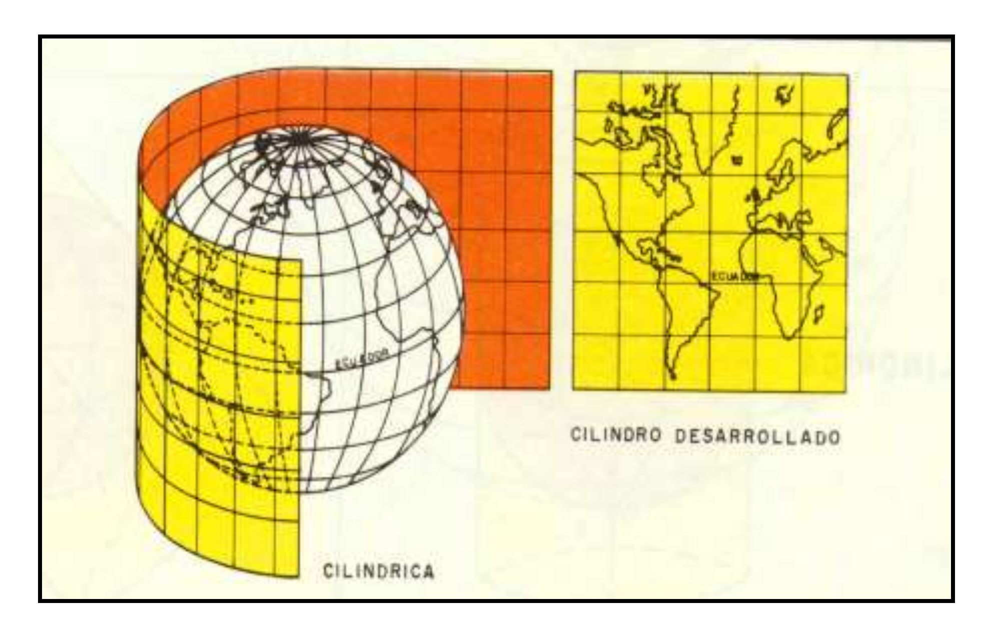


Figura 8.13: Desarrollo de la proyección cilíndrica (Degioanni, 2001).

En Argentina el sistema de proyección utilizado es el Gauss - Krüger que es una variante de la proyección Mercator (proyección cilíndrica). Para transformar coordenadas geográficas a coordenadas de proyección Gauss – Krüger se utiliza como elipsoide o datum el WGS84.

En el país se han definido 127 puntos geodésicos (puntos en el territorio donde el elipsoide mejor representa al geoide), que constituyen una red geodésica denominada POSGAR (Sistema Geodésico Nacional) adoptado por el Instituto Geográfico Nacional en mayo de 1997. Esta red permite georreferenciar la cartografía del territorio nacional al sistema Gauss Krüger u otro (p.e. Mercator). Por otra parte, esta red geodésica se integra a una red del continente sudamericano denominada SISGAR (Sistema de Referencia Geodésico para América del Sur) y a través de ella, al sistema geocéntrico mundial ITRF (Marco de Referencia Terrestre Internacional). De esta manera se marcha hacia una unificación global de la representación de la superficie terrestre.

Sistema de proyección Gauss - Krüger.

Este sistema divide a la República Argentina (sector continental e Islas Malvinas) en 7 fajas meridianas numeradas de oeste a este (Figura 8.14.). Cada faja de la grilla mide 3° de ancho (longitud) y 2° de largo (latitud), teniendo como origen la intersección del meridiano central con el Polo Sur. Al Polo Sur se le asigna el valor 0 metro y al meridiano central de la faja el valor arbitrario 500.000 m, antecedido por los números del 1 al 7 para los meridianos 72°, 69°, 66°, 63°, 60°, 57° y 54°, respectivamente (Figura 8.14).

De esta manera queda definida una retícula que divide el territorio nacional en rectángulos regulares y puede ser representada en mapas a diferentes escalas, en hojas de papel de tamaño cómodo para utilizar. Por otra parte, establece un sistema de numeración de los espacios, que constituye la base de la cartografía oficial.

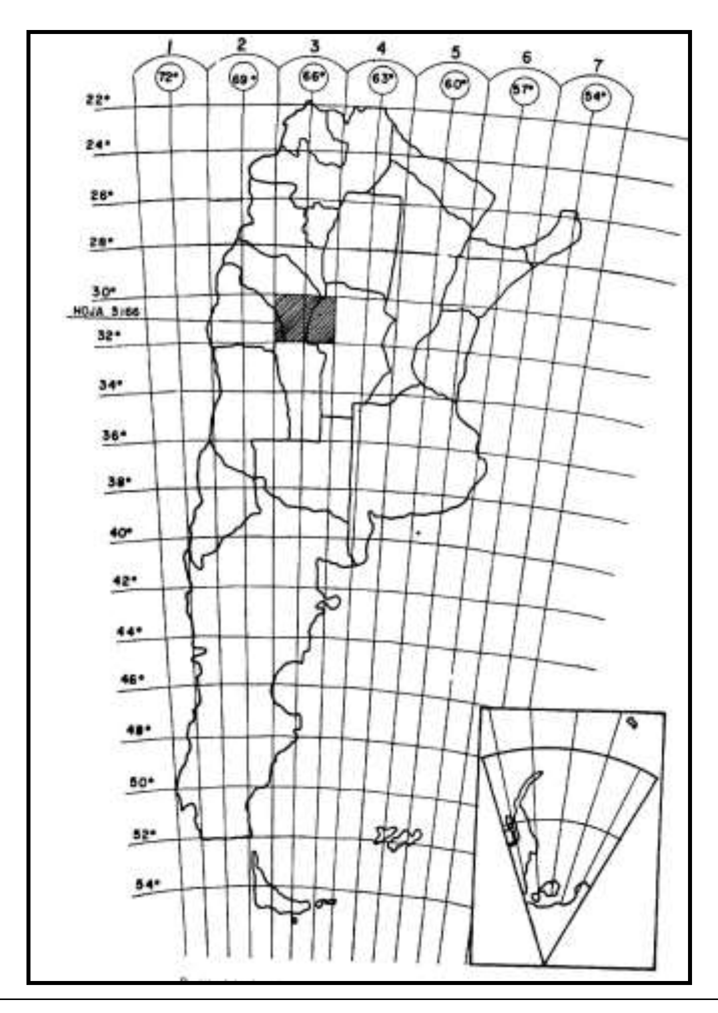


Figura 8.14: División Cartográfica del Territorio Nacional (Continente e Islas Malvinas) según el Sistema de Proyección Gauss Krügger, (IGN, 2011).

Los valores de las coordenadas planares se leen de la siguiente manera (seguir Figura 8.15):

- Los ejes cartesianos están invertidos por tanto el eje “y” tiene dirección E - O y el eje “x” tiene dirección N - S.

- Suponiendo el punto (a) cuya coordenada en el eje *x* es: 6.525.633 m y en el eje *y* es 5.420.000 m, indicando que el punto se encuentra a 6.525.633 m del polo Sur, se localiza en la faja 5 (número inicial de la coordenada en *y*) y se encuentra a 80.000 metros al Oeste del meridiano central de la faja 5 (meridiano 60°). Este número resulta de la diferencia entre el valor arbitrario del meridiano central y la coordenada en y del punto (i.e. 500.000 m - 420.000 m= 80.000 m).

El punto (b) tiene como coordenadas en el eje x 6.932.000 m, lo que indica la distancia al Polo Sur; y la coordenada en el eje *y* 5.510.000 m, por lo que este punto se localiza también en la faja 5 y se encuentra a 10.000 metros al Este del meridiano central. Este número resulta de restar 510.000 - 500.000 = 10.000 (recordar que los meridianos de las 7 fajas tienen como valor arbitrario 500.000).

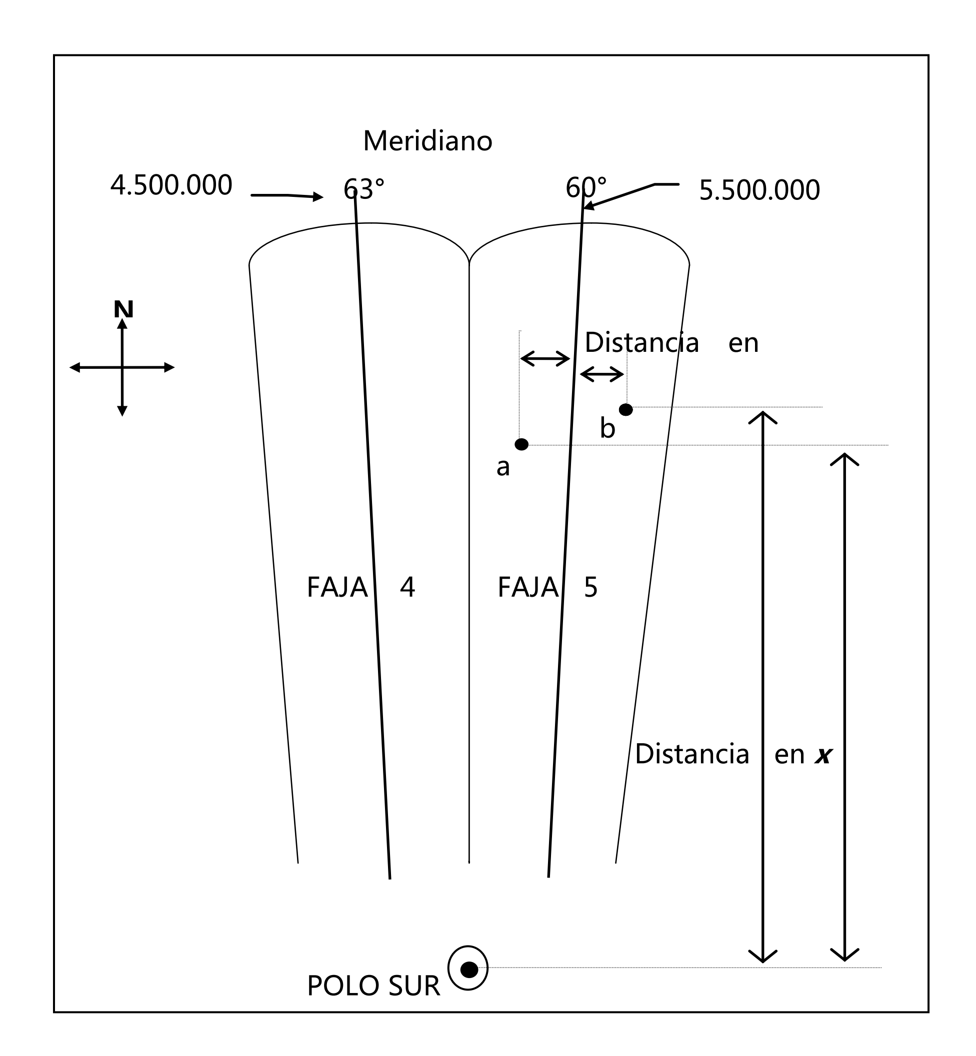


Figura 8.15: Esquema coordenadas proyección Gauss Krüger, para dos puntos a y b.

8.7. Concepto de teledetección

La teledetección, de modo estricto, es cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto con ella. Sin embargo, y de modo más restringido, y en el ámbito de las ciencias de la Tierra, la teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites (Muñoz Nieto, 2006).

8.7.1. Componentes de un sistema de teledetección:

El fenómeno de la teledetección es posible gracias a la interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres. Estas tienen un comportamiento reflectivo variable, condicionado tanto por factores externos (ambientales) como por características fisicoquímicas propias al momento de la toma de la imagen. Para que pueda llevarse a cabo el proceso de teledetección, se requieren al menos tres componentes:

- Una fuente de energía;
- La superficie objeto de estudio;
- Un sistema que capte información del objeto de estudio.

El tercer componente hace referencia a los sensores remotos, los cuales son instrumentos que detectan a distancia propiedades de los objetos o fenómenos, midiendo algún tipo de radiación proveniente de los mismos y tienen la capacidad de medir variaciones espectrales, temporales y espaciales de los objetos bajo estudio (Figura 8.16).

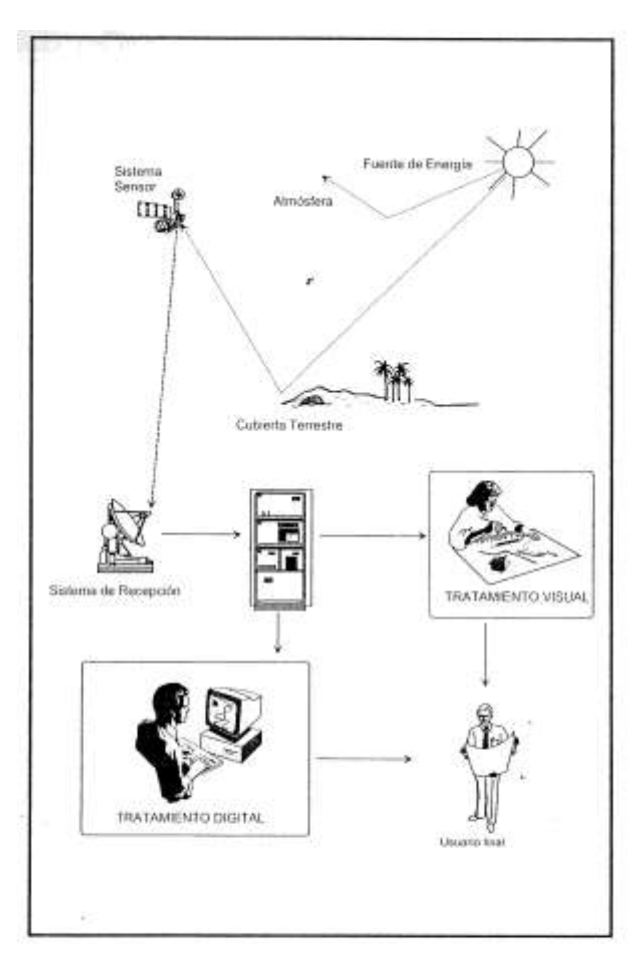


Figura 8.16: Componentes de la teledetección (Chuvieco, 1996).

La teleobservación (o sistema de adquisición de datos a distancia) permite individualizar elementos de la superficie terrestre. Para ello se utilizan sensores remotos que captan la energía electromagnética emitida y reflejada por los distintos componentes de la superficie terrestre (cursos de agua, infraestructura, etc.) y que la retransmiten en forma digital a las estaciones receptoras.

Así cuenta Chuvieco, un especialista en el tema, cómo se obtienen las imágenes satelitarias. Reproducimos un fragmento adaptado de su libro Fundamentos de teledetección espacial (1996):

"Nuestros sentidos perciben un objeto sólo cuando pueden descifrar la información que éste les envía. Por ejemplo, somos capaces de ver un árbol porque nuestros ojos reciben y traducen convenientemente una energía luminosa procedente del mismo. Esa señal, además, no es originada por el árbol, sino por un foco energético exterior que lo ilumina. De ahí que no seamos capaces de percibir ese árbol en plena oscuridad.

Este sencillo ejemplo nos sirve para introducir los tres principales elementos de cualquier sistema de teledetección: Sensor (nuestro ojo), objeto observado (árbol) y flujo energético que permite poner a ambos en relación.

En el caso del ojo, ese flujo procede del objeto por reflexión de la luz solar. Podría también tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. Éstas son, precisamente, las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión.

La primera de ellas es la forma más importante de teledetección, pues se deriva directamente de la luz solar. El sol ilumina la superficie terrestre, que refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella. Ese flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo transmite posteriormente a las estaciones receptoras.

De igual forma, la observación remota puede basarse en la energía emitida por las propias cubiertas (géiseres, volcanes, aguas termales), o en la que podríamos enviar desde un sensor que fuera capaz, tanto de generar su propio flujo energético, como de recoger posteriormente su reflexión sobre la superficie terrestre.

En cualquiera de estos casos, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética (la radiación es una forma de transmisión de la energía junto con la convección y la conducción).

La energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético.

Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de onda (l) y frecuencia (F). La primera hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda, mientras que la frecuencia designa el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo.

Podemos definir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suele establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electromagnético Comprende desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos X) hasta las kilométricas (telecomunicaciones).

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual:

Espectro visible (0.4 a 0.7 micrones). Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar.

Infrarrojo cercano o próximo (0.7 a 1.3 micrones). A veces se denomina también infrarrojo reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de filmes dotados de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

Infrarrojo medio (1.3 a 8 micrones), en donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Resulta idóneo para estimar contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.

Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 micrones), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres."

8.7.2. Plataformas utilizadas en teledetección

Las plataformas se pueden dividir en dos tipos: a) aéreas y b) espaciales. Las plataformas aéreas son sistemas que solamente pueden operar dentro de la atmósfera terrestre. Dentro de ellas se incluyen globos, aviones y helicópteros.

Las plataformas espaciales tienen capacidad para operar en el espacio extraterrestre y las más difundidas en la actualidad son los satélites.

Satélites de recursos naturales

Un factor de importancia que hay que tomar en consideración cuando se buscan imágenes es la relación que existe entre el tamaño de la escena y la resolución espacial. Imaginemos una cámara con teleobjetivo. A medida que éste enfoca rasgos de pequeño tamaño, el campo visual disminuye. Esto se aplica también a las imágenes de satélite. Una gran resolución espacial digamos un metro, se corresponde con un área de cobertura pequeña (y archivos digitales de gran tamaño). Al escoger una imagen, se deben equilibrar estas dos características de forma que la resolución espacial sea lo bastante alta como para distinguir los objetos que se necesita identificar. No obstante, el tamaño de la escena ha de ser lo suficientemente ancho como para colocar en ello dichos objetos en su perspectiva adecuada.

Los satélites comercialmente más difundidos son los de la serie *Landsat* (EE.UU.) y el *Spot* (CEE). Éstos, brindan información sobre el medio ambiente y los recursos naturales y sobre el medio construido. Existen satélites de recursos naturales lanzados por India, Rusia, Canadá y Argentina, entre otros. Existen satelites de alta resolución como los *QuickBird* (0.61 – 0.80 m) y los *Ikonos* (1 m).

Las imágenes satelitarias se utilizan, entre otros fines, para estudio de inundaciones, diseño del drenaje hídrico superficial de una región, estimación de la productividad primaria de mares y océanos, estudio de la contaminación, detección de cardúmenes, reconocimiento de tormentas y de cuencas sedimentarias petroleras y gasíferas, estimación de áreas sembradas según los distintos cultivos, mapeo de áreas agrícolas irrigadas, estimación de erosión hídrica, inventario de bosques, delimitación de áreas urbanas, uso y clasificación del suelo urbano, expansión urbana en el uso de la tierra urbana-periurbana, e identificación de asentamientos urbanos.

Landsat

Los satélites Landsat (EE.UU.) se mueven en sentido norte-sur pasando muy cerca de los polos; cruzan la Tierra con una trayectoria que semeja los gajos de una naranja. Se encuentran a una altura de 700 km sobre la superficie terrestre, toman datos de la misma escena cada 16 días y llevan a bordo dos tipos de sensores: MSS y TM.

El barredor multiespectral o Multi Spectral Scanner (MSS) recopila datos de la superficie terrestre en varias bandas espectrales, con una resolución espacial de 80 m aproximadamente. La tabla 8.1 muestra las distintas bandas del satélite Landsat y sus aplicaciones

Tabla 8.1: Características del barredor multiespectral o Multi Spectral Scanner (MSS).

Banda	**Longitud de onda (en micrones)**	**Porción del espectro electromagnético**	**Aplicaciones**
4	0.5 a 0.6	Verde	Penetración en el agua, turbidez, nieve, sedimentación en la misma, infraestructura urbana y cuerpos de agua.
5	0.6 a 0.7	Rojo	Estudios urbanos, infraestructura caminera y cuerpos de agua.
6	0.7 a 0.8	Infrarrojo	Vegetación, redes de drenaje.
7	0.8 a 1.1	Infrarrojo	Estudios de vegetación, suelos, humedad, contacto entre tierra y agua.

El mapeador temático (TM) de los satélites Landsat provee información de la superficie terrestre en las siguientes amplitudes de onda del espectro electromagnético. La tabla 8.2 muestra las características del mapeador temático (TM).

Tabla 8.2: Características del mapeador temático (TM).

Bandas	Longitud de onda (en micrones)	Resolución espacial (en metros)	Aplicaciones
1	0.45 a 0.52	30	Penetración en cuerpos de agua. Costas. Contacto entre suelo y vegetación.
2	0.52 a 0.6	30	Vegetación
3	0.6 a 0.69	30	Vegetación
4	0.76 a 0.9	30	Biomasa. Delimitación de cuerpos de agua.
5	1.55 a 1.75	30	Contenido de humedad
6	10.4 a 12.5	120	Mapeo térmico
7	2.08 a 2.35	30	Geología

Spot

El satélite Spot (CEE) tiene a bordo el sensor ARV (Alta Resolución Visible) que tiene dos modos de funcionamiento en el espectro visible e infrarrojo cercano:

Un modo pancromático (en blanco y negro con una resolución espacial de 10 metros) correspondiente a una observación sobre una amplia banda espectral.

Un modo multibanda (en color, con una resolución espacial de 20 m) correspondiente a una observación sobre tres bandas espectrales más anchas. La tabla 8.3 muestra las características de un satélite Spot.

Tabla 8.3: Satélite SPOT, Características del modo multibanda y modo pancromático.

Características del instrumento	Modo multibanda	Modo pancromático
Bandas espectrales	0.50 a 0.59 µm 0.61 a 0.68 µm 0.79 a 0.89 µm	0.51 a 0.78 µm
Dimensión del píxel	20 x 20 m	10 x 10 m

QuickBird

Fue el primer satélite de la constelación submétrica en ofrecer imágenes de la tierra de alta precisión y alta resolución. Digital Globe completó satisfactoriamente una reasignación de orbita a una altura de 482 km logrando extender la misión del sensor. Ofrece imágenes submétricas de resolución, alta precisión de georeferenciación, y una gran capacidad de almacenamiento.

Sus productos pancromáticos y multiespectrales son especiales para una amplio rango de aplicaciones geoespaciales.

Los beneficios que presenta este sistema estan referidos a que son imágenes precisas y de alta calidad para generación de mapas, detección de cambios, y análisis de imágenes. Geolocalización y precisión para la creación de mapas de áreas remotas sin el uso de puntos de control, alta capacidad para capturar gran cantidad de imágenes con una alta frecuencia de todo el mundo. Extiende el rango de los objetos reconocibles en imágenes, y mejora la interpretación. La figura 8.17 muestra una imagen QuickBird de 0.80 m de resolución de las ruinas de Machu Pichu (Perú).



Figura 8.17: Machu Pichu, Perú (Digital Globe, Inc. 2012)

IKONOS

El satélite Ikonos, lanzado en septiembre de 1999, adquiere imágenes blanco y negro con 1 m de resolución e imágenes a color (4 bandas) con 4 m de resolución. Las imágenes cubren una superficie de 11 km x 11 km. Ikonos es programable y el instrumento de toma de imágenes orientable, lo que permite la revisita de un mismo sitio en menos de 3 días. Las imágenes Ikonos se comercializan por km², así el usuario define una zona de interés, de cualquier forma pero de una superficie mínima, que puede estar compuesta de una o de varias porciones de escena.

Es el primer satélite comercial del mundo que toma imágenes en blanco y negro con una resolución de 1 m e imágenes multiespectrales con resolución de 4 m. De este satélite se pueden también obtener imágenes color de 1 m de resolución.

Las imágenes Ikonos se presentan con dos procesamientos geométricos diferentes:

- Ikonos Geo:

Es un producto que define el futuro de las imágenes de alta resolución; está disponible tanto para imágenes pancromáticas (1 m de resolución) como para imágenes color o multiespectrales de 4 m de resolución, lo cual resulta excelente para una variedad de análisis y aplicaciones que requieren bandas multiespectrales. Actualmente es el producto de mayor resolución y bajo costo, fácil y rápido de visualizar. Es ideal para respuesta a emergencias, interpretación y monitoreo de cultivos, manejo de desastres, etc., que requieren reportes inmediatos

Las imágenes son geométricamente corregidas con un error estándar (RMSE) de 25 m, excluyendo los efectos de desplazamiento del terreno causados por el relieve. Este proceso de corrección remueve las distorsiones de las imágenes introducidas por los procesos de capturas y remuestrea las imágenes a una proyección de mapas escogida por el usuario; diferentes tipos de proyecciones están disponibles (UTM, TM, Gauss Krüger, etc.). Este producto no incluye la tarea de unión o mosaicos de diferentes imágenes. Este producto es de fácil utilización por parte de los usuarios, con o sin experiencia en procesamiento de imágenes.

- Ikonos Ortorectificadas

Se trata de imágenes con precisiones de mapa métricas. Comparativamente, son productos menos costosos y de obtención más rápida que las tradiciones ortofotos aéreas. Los procesos de ortorectificación remueven las distorsiones introducidas por la variabilidad y geometría de relieve y remuestrean las imágenes en una proyección de mapas escogida por el usuario. Incluye el proceso de unión o mosaicos de diferentes imágenes.

La Figura 8.18 compara un mismo objeto registrado por dos satélites diferentes.




Figura 8.18:. Comparación entre una imagen Aster (der.) y una imagen Ikonos (izq.).

A continuación se pueden apreciar imágenes de satélite Ikonos correspondientes a tres unidades ambientales de la región del centro-sur de Córdoba, las cuales fueron extraídas del sistema Google Earth © (Figura 8.19 a 8.21).



Figura 8.19: Unidad Ambiental llanura ondulada, bien drenada, con procesos de erosión hídrica. Zona Rural Alcira Gigena, Córdoba. (Google Earth ©, 2012).



Figura 8.20: Unidad Ambiental llanura mal drenada, con procesos de inundación y salinización. (Google Earth ©, 2012).



Figura 8.21: Unidad Ambiental llanura medanosa, con procesos de erosión eólica (planicies de deflación-acumulación). (Google Earth© , 2012).

GOOGLE EARTH©

Los problemas propios de un mundo globalizado demandan con urgencia que las personas aprendan a manejar información geográfica cada vez más compleja. Ya no son suficientes los mapas que se limitan a un territorio específico y que contienen un solo tipo de información (política, económica, topográfica, etc.); en la actualidad, es necesario saber construir y utilizar mapas dinámicos que permitan apreciar diferentes territorios y analizar, con su ayuda, la mayor cantidad de información posible.

Los avances de las Tecnologías Informáticas han posibilitado responder satisfactoriamente a estas necesidades planteadas por las Ciencias ambientales. Las fotografías aéreas e imágenes satelitales en papel han cumplido exitosamente un ciclo, el cuál concluyó con la aparición de Google Earth©.

Google Earth© combina fotos satelitales (tomadas en los tres últimos años), mapas y una base de datos muy completa. Estos elementos permiten al usuario navegar libremente por cualquier lugar de la Tierra, observar detalladamente todos sus territorios y desplegar sobre estos, de manera simultánea, basándose en datos y fotografías reales, diversos tipos de información geográfica (topográfica, hidrográfica, demográfica, histórica y cultural, entre otros).

Google Earth© permite:

- Observar la Tierra en tres dimensiones (como si la estuviera viendo desde el espacio) y rotarla libremente utilizando el ratón.

- Seleccionar un territorio específico, aproximarse a él desde la atmósfera y observarlo desde diferentes alturas. A menor altura, mayor es el nivel de detalle.

- Desplazarse libremente entre ciudades de diferentes países del mundo, volar de un país a otro o de un continente a otro, cruzar océanos y recorrer territorios extensos como desiertos y selvas.

- Conocer los nombres de todos los países y de sus ciudades principales, poblaciones, mares, lagos, volcanes, accidentes geográficos más importantes, etc.

- Aproximarse a las ciudades y observar, con asombroso nivel de detalle, calles, edificios, casas, monumentos, ríos, etc.

- Observar dorsales oceánicas y las principales zonas de compresión y subducción de la Tierra.

- Observar e identificar tipos o formas de relieve en cualquier lugar del mundo (nevados, volcanes, llanuras, cordilleras, valles, altiplanos, etc.) y conocer la medida exacta de su altura sobre el nivel del mar.

- Cambiar el ángulo de visualización de un territorio para poder observarlo en perspectiva.

- Visualizar meridianos, paralelos y trópicos.

- Conocer las coordenadas de cualquier punto de la Tierra con solo ubicar el ratón sobre el sitio.

- Marcar sitios de interés y compartir información sobre ellos, a través de Internet, con otras personas.

- Guardar imágenes y compartirlas con otras personas por medio del correo electrónico.

- Medir la distancia entre dos sitios por medio de una línea recta o trazando una trayectoria.

La Figura 8.22 muestra la pantalla principal de sistema Google Earth©.



Figura 8.22: Pantalla principal de Google Earth©, 2012.

8.8. Análisis e interpretación visual de imágenes satelitales

La interpretación de imágenes se realiza mediante un conjunto de técnicas destinadas a detectar, delinear e identificar objetos y/o fenómenos en una imagen e interpretar su significado.

Las principales características que resultan observables en las imágenes son: la *forma, el tamaño, el tono, el color, la sombra, la forma en que los objetos se distribuyen sobre la superficie terrestre y la manera en que dichos objetos se agrupan.*

Además, estas técnicas permiten realizar diversos análisis: por ejemplo, se puede rastrear el comportamiento de un río a lo largo del tiempo; también se puede estudiar cómo evolucionan los cultivos en distintas zonas en una misma fecha o, también, cómo se comporta un derrame de petróleo en un océano en diferentes fechas.

Para facilitar la interpretación, algunas imágenes satelitales se hacen en color. Las imágenes color son el resultado de trabajos especiales de laboratorio que permiten obtener imágenes con tonalidades diferentes. Dado que el color natural ofrece poco contraste (presenta, por ejemplo, tonos verde oscuro para la vegetación y pardos para zonas urbanas), se utiliza el falso color compuesto (la cobertura vegetal, por ejemplo, aparece en tonos rojos o pardos).

8.8.1. Composición de color

Color verdadero**:** rojo= rojo, verde= verde y azul=azul (imágenes 3, 4 y 5).

Las diferencias en el color son consecuencia de las variaciones en la longitud y frecuencia de las ondas electromagnéticas reflejadas por los objetos en dirección al sensor remoto.

A continuación se enumeran algunos ejemplos orientativos:

- *baja reflectancia*: vegetación verde (cultivos en estado vegetativos, montes, bosques), zonas húmedas o saturadas, agua sin sedimentos. Se registran en verde oscuro, azul.
- *mediana reflectancia*: vegetación amarillenta (pastizales secos, cultivos en estado de maduración), suelos recién arados o con vegetación muy pequeña, caminos, taludes y base de barrancas (sin vegetación), formaciones medanosas activas, agua con sedimentos. Se registran en tonalidades verde y marrón o pardo claro.
- *alta reflectancia*: calcáreo en superficie, eflorescencias salinas, depósitos de arenas, roca expuesta. Se registran de color blanco.

Composición falso color compuesto: permite visualizar e identificar diferentes objetos. La tabla 8.4 y la Figura 8.23 presentan una síntesis de cómo se ven algunos elementos en las imágenes en falso color compuesto.

Tabla 8.4: Visualización de los elementos según las imágenes en falso color compuesto.

Objeto	**Imágenes en falso color compuesto estándar**
Vegetación sana	Rojo oscuro
Vegetación con estrés	Naranja/Rosado
Agua con sedimentos en suspensión	Celeste
Sombras	Negro
Nieve/Nubes/Salinas	Blanco
Agua pura sin sedimentos en suspensión	Azul oscuro/Negro
Áreas urbanas	Celeste
Suelo desnudo	Azul



Figura 8.23: Composición falso color: rojo=verde, azul= verde. GEO SAT ©. 2011.

8.8.2. Tamaño, forma y orientación de los elementos visibles

Para el reconocimiento de diferentes elementos y sus relaciones, el tamaño relativo y la forma observada desde una posición superior (en planta) es importante para identificar e interpretar teniendo presente siempre la escala de la imagen. Por ejemplo el ancho de una cárcava puede ser estimado al compararse con el ancho de un camino generalmente conocido.

La presencia, forma y densidad de las vías de drenaje permiten deducir algunas características del relieve, como el tipo de relieve (pronunciado, normal ondulado, normal plano, subnormal), dirección y complejidad de las pendientes, ubicación y orientación de lomas y bajos (Figura 8.19).

Las formas geométricas están asociadas a elementos de origen antrópico (caminos, forma de lotes, plantaciones, líneas de labranza). La forma y tamaño de los lotes puede dar una idea del tipo e intensidad de uso del suelo, altamente vinculado a los procesos de degradación.

La orientación de los elementos también es un aspecto interpretativo interesante a considerar. Un ejemplo de ello es la presencia de médanos longitudinales con dirección NE-SO en la llanura medanosa del centro-sur de Córdoba (Figura 8.21).

8.8.3. Textura

Es la repetición en los cambios de tonos. Zonas con idénticas tonalidades, indican una homogeneidad del área en cuanto a sus características naturales (fisiográficas, suelos, vegetación) y aquellas de origen antrópico (uso y manejo). Por ejemplo la textura de un área fuertemente ondulada con carbonato en superficie: manchas blancas (media loma) delimitadas por líneas verde oscuro (vías de escurrimientos, bajos), presenta una textura "overa"; áreas con afectación hidrohalomórfica, de alta heterogeneidad presenta una textura "variegada" o "manchada", en la que en pequeños espacios se entremezclan varios tonos de blanco con tonalidades de verde y azul (Figura 8.20.); áreas bien drenadas presentan una textura "nítida" u homogénea, en la que los tonos se repiten a distancias más grandes que en el caso anterior (Figura 8.19 y Figura 8.21).

8.8.4. Patrón de distribución

Es la distribución o reparto en el espacio de elementos registrados en la imagen. Una distribución de tipo geométrica en general está asociada a elementos no naturales como presencia de alambrados, caminos, canales hechos por el hombre, dirección de labores, plantaciones de árboles, etc. Por el contrario, cuando los elementos se distribuyen de manera no uniforme, indican presencia de cuerpos o formaciones naturales como por ejemplo un monte o isleta de chañar, red de drenaje, áreas de derrames, áreas de lagunas, peladales.

8.8.5. Resolución

Es el tamaño mínimo en el que son registrados los objetos en la imagen. Ello depende, como se explicó precedentemente del tipo de satélite.

Para interpretar visualmente una imagen de satélite se sugiere seguir los siguientes pasos:

- Identificar el tipo de sensor que registró la imagen (Landsat, Spot, Ikonos, etc). Anotar la fecha en que se tomó
- Detallar los respectivos números de órbita y cuadro.
- Ubicar la imagen y su área de cobertura en un mapa político del partido, departamento o provincia.
- Repetir la actividad sobre una carta topográfica o mapa físico de la zona.
- Si la imagen es en blanco y negro, armar una tabla de equivalencias entre los tonos de grises de la imagen y los objetos representados, para facilitar la interpretación.
- Si es en falso color, armar una tabla de equivalencias entre los colores de la imagen y los objetos representados, para facilitar la interpretación.
- Calcular la escala de representación de la imagen, para tener una idea más clara de la magnitud de cada uno de los elementos que se ven en la imagen.

- Identificar la forma que tiene cada elemento para relacionarlo con los objetos que representa; por ejemplo: una línea recta podría representar una calle; una línea irregular, un río o arroyo; un círculo, un pivote de riego; formas irregulares, zonas con montes de frutales o zonas periurbanas sin uso del suelo; figuras cuadradas pueden corresponder a parcelas con cultivos en áreas rurales o a manzanas en áreas urbanas.

- Analizar las diferentes texturas de la imagen.

- Calcular la extensión de ciertos elementos puede ser muy útil para reconocer lo que representan (una línea recta de 100 m puede ser una calle pero una línea recta de 5.000 m puede ser una avenida, una ruta o el ferrocarril).

La interpretación visual permite realizar mapas interpretativos de tierras a diferentes escalas: reconocimiento, semidetalle o detalle.

De acuerdo a la metodología propuesta por el International Institute for Aerial survey and earth sciences (ITC, 1978), el procedimiento de mapeo de los recursos naturales debiera dividirse en tres etapas:

1. *Fase preliminar:* en esta primera etapa el objetivo es generar mapas temáticos preliminares o “mapas base”. Abarca una etapa de recolección de la información cartográfica, fotográfica, de imágenes satelitales, climática, entre otros datos disponibles y una etapa de fotointerpretación intensiva de fotografías aéreas a la escala correspondiente según el objetivo del trabajo. A partir de este trabajo, se definen y mapean las unidades cartográficas, red de drenaje natural o artificial, elementos naturales y culturales, para finalmente obtener los mapas bases preliminares, de vegetación, suelos, tierras, asentamientos humanos, uso del suelo, etc.

2. *Fase de campo*: el objetivo de este plan es la comprobación y caracterización en el terreno de las unidades cartográficas definidas en la fase preliminar.

3. *Fase final o procesamiento*: A partir del análisis de los datos generados en el gabinete y su posterior corroboración en el campo, se procede relacionarlos e integrarlos con el fin de definir las unidades cartográficas definitivas, (Figura 8.24).

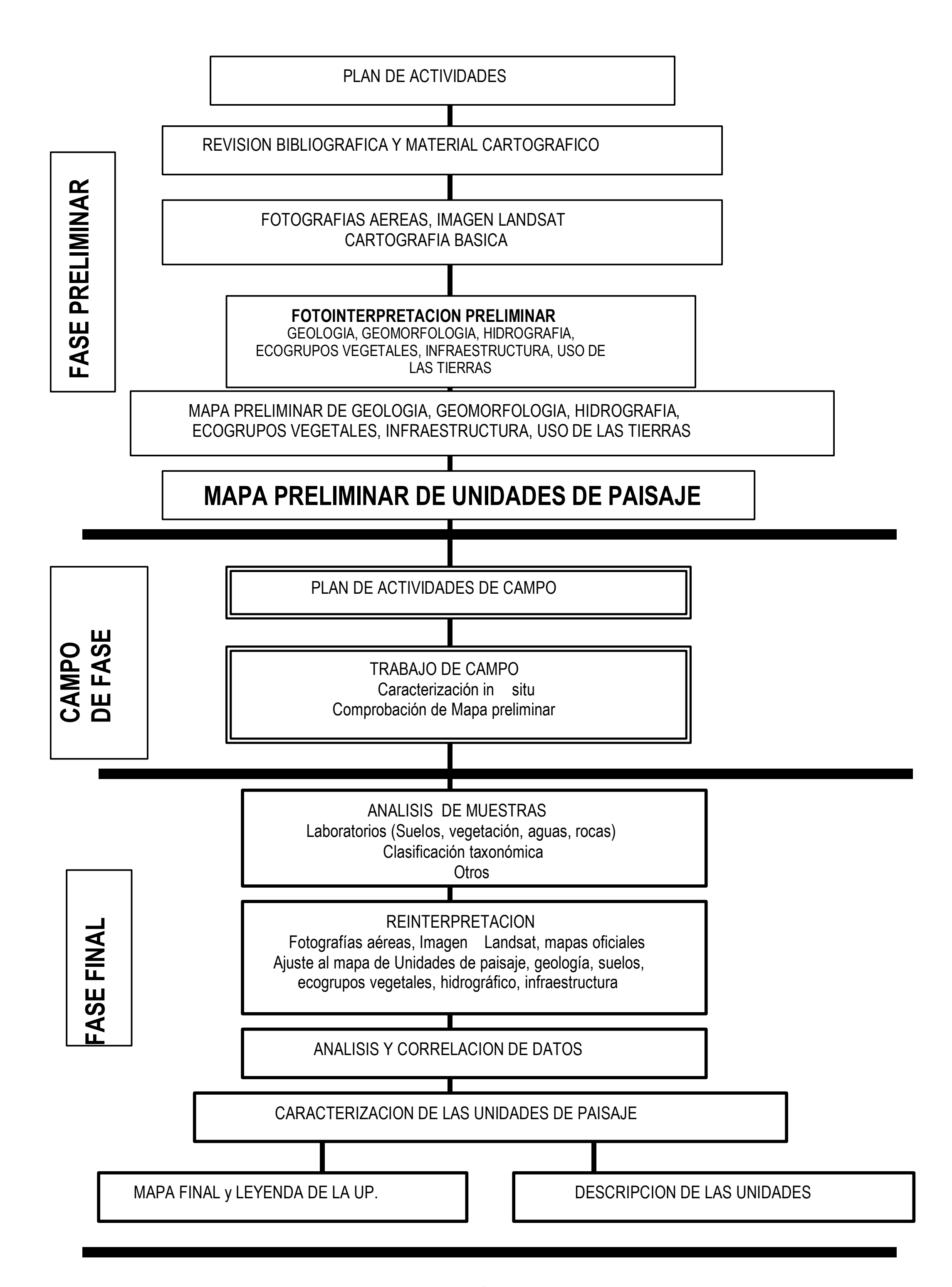


Figura 8.24: Esquema de la metodología para el mapeo de recursos naturales.

8.9. Tipos de Mapas

En función de la finalidad del trabajo, la metodología y la escala del mapa a elaborar, se pueden establecer los siguientes tipos de mapas (Tabla 8.5):

Tabla 8.5: Tipos de Mapas (Modificado de Porta *et al.*, 1994).

Tipo de Mapa	Finalidad	Metodología básica del trabajo	Escala del mapa a elaborar (orientativo)
Esquemático	Inventario muy general. Información preliminar	Compilación de información. Información indirecta. Inferencia	1: 2.000.000 (Imágenes de satélite)
Exploratorio	Inventario general de recursos	Exámen de grandes áreas en poco tiempo. Información preexistente. Transectas rápidas	1:2.000.000 a 1: 500.000 (Imágenes de Satélite)
Generalizado	Planificación regional. Localización de proyectos de desarrollo.	Transectas rápidas	1: 750.000 a 1: 250.000 (Imágenes de satélite)
Reconocimiento	Estudios de previabilidad. Localización de proyectos. Planificación local. Estudios integrados	Teledetección. Prospección a campo mediante transectas. Información preexistente.	1: 100.000 a 1: 50.000 (Imágenes de satélite, fotomosaicos, Hojas topográficas, fotocartas)
Semidetallado	Evaluación económica. Estudio de viabilidad de alternativas. Implementar programas de desarrollo.	Teledetección combinada con una prospección a campo importante. Apoyo de la fotointerpretación.	1: 50.000 a 1:20.000 (Fotomosaicos, Hojas topográficas, fotografías aéreas)
Detallado	Diseño y ejecución de proyectos concretos. Planes de conservación de suelos. Estudios a nivel de establecimientos rurales	Prospección a campo, principalmente. Apoyo limitado de la fotointerpretación.	1: 15.000 a 1: 5.000 (Fotografías aéreas)
Muy detallado	Estudios especiales para planificación. Parcelas de experimentación.	Prospección sistemática.	< 1: 5.000

Toda representación geográfica debe reunir los siguientes requisitos mínimos:

- Presentar límites definidos a partir de polígonos cerrados,
- clara diferenciación de objetos,
- limpidez o claridad,
- escala,
- orientación (norte es suficiente),
- título,
- referencias,
- localización,
- fecha,
- autor.

8.10. Aplicaciones de los SIG

Tal cómo se mencionó al inicio del presente capítulo los software son parte integrante de los actuales sistemas de información geográfica. Los mismos permiten la manipulación, análisis y visualización de la información de manera rápida y segura. Cada programa (software) de SIG es un conjunto de algoritmos para acceder, analizar y sintetizar datos espaciales y sus atributos asociados. Algunas funciones son clásicas y las encontramos en prácticamente todos los paquetes de SIG y otras funciones son más particulares. Existen programas que enfocan más en el manejo de la cartografía vectorial y otros para la cartografía ráster. Casi todos utilizan ya ambos formatos, aunque con predominio de uno de ellos.

La elección del programa SIG depende de las aplicaciones y análisis que se quiere hacer. No hay ningún líder entre los programas, algunos tienen muy buenas herramientas para el tratamiento de imágenes de satélite y otros incluyen un amplio rango de módulos para el modelado y evaluaciones estadísticas. Los usuarios experimentados utilizan normalmente varios programas distintos, según características de los datos y aplicaciones.

Algunos ejemplos de las aplicaciones que se les pueden dar a los SIG, son entre muchas otras, los monitoreos de especies en peligro de extinción, los análisis de relieves, la localización de las áreas más probables de inundación de una zona, detectar y/o cuantificar zonas deforestadas, medir el crecimiento y la variación de la densidad poblacional en el tiempo, diagnosticar las pérdidas de áreas de cultivos y de vegetación natural o el crecimiento de los diferentes usos de suelo a través del tiempo (Ramos Reyes, 2012).

En relación al aspecto ambiental del ordenamiento territorial se pueden utilizar entre muchas otras posibilidades además de las mencionadas anteriormente, para la delimitación de cuencas y redes hidrográficas con el respectivo dimensionamiento de las mismas en cuanto a longitud, pendiente y superficie, permitiendo generar la información y los archivos de salida necesarios para posteriormente alimentar modelos de simulación como HEC-HMS y RUSLE2 analizados en los capítulos 2 y 3, respectivamente.

En la Tabla 8.6 se presenta un listado con los principales programas SIG existentes, los sistemas operativos en los que pueden funcionar sin emulación, así como su tipo de licencia.

Tabla 8.6: Principales programas computacionales existentes para manejo de sistemas de información geográfica (Wikipedia, 2012)

Software SIG	Windows	Mac OS X	GNU/Linux	BSD	Unix	Entorno Web	Licencia de software
ABACO DbMAP	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Java	Software no libre
ArcGIS	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	Software no libre
Autodesk Map	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
Bentley Map	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
Capaware	Sí (C++)	No	No	No	No	No	Libre: GNU GPL
Caris	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
CartaLinx	Sí	No	No	No	No	No	Software no libre
El Suri	Java	Java	Java	Java	Java	No	Libre: GNU
GE Smallworld	Sí	?	Sí	?	Sí	Sí	Software no libre
Generic Mapping Tools	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Libre: GNU
Geomedia	Sí	No	No	No	Sí	Sí	Software no libre
GeoPista	Java	Java	Java	Java	Java	Sí	Libre: GNU
GeoServer	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Java	Libre: GNU
GeoStratum	Sí (Flex/Java)	Sí (Flex/Java)	Sí (Flex/Java)	Sí (Flex/Java)	Sí (Flex/Java)	Sí (Flex/Java)	Software no libre
GestorProject - PDAProject	Sí	No	No	No	No	Java	Software no libre
GRASS	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Mediante pyWPS	Libre: GNU
gvSIG	Java	Java	Java	Java	Java	No	Libre: GNU
IDRISI	Sí	No	No	No	No	No	Software no libre
ILWIS	Sí	No	No	No	No	No	Libre: GNU
JUMP	Java	Java	Java	Java	Java	No	Libre: GNU
Kosmo	Java	Java	Java	Java	Java	En desarrollo	Libre: GNU
LatinoGis	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
LocalGIS	Java	Java	Java	Java	Java	Sí	Libre: GNU
Manifold	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
MapGuide Open Source	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	LAMP/WAMP	Libre: LGNU
MapInfo	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	Software no libre
MapServer	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	LAMP/WAMP	Libre: BSD
Maptitude	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
MapWindow GIS	Sí (ActiveX)	No	No	No	No	No	Libre: MPL
ortoSky	Sí (C++)	No	No	No	No	No	Software no libre
Quantum GIS	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Libre: GNU
SAGA GIS	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Libre: GNU
SavGIS	Sí	No	No	No	No	Integración con Google Maps	Software no libre
SEXTANTE	Java	Java	Java	Java	Java	No	Libre: GNU
SITAL	Sí	No	No	No	No	Integración con Google Maps	Software no libre
SPRING	Sí	No	Sí	No	Solaris	No	Libre
SuperGIS	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
TatukGIS	Sí	No	No	No	No	?	Software no libre
TNTMips	Sí	No	No	No	Sí	Sí	Software no libre

Bibliografía

Aronoff, S., 1989. GIS: A Management Perspective, WDL Publications, Ottawa, Canadá.

Bosque Sendra, J.; Escobar, J.; García, E. y M. Jesús Salado. 1994. Sistemas de información geográfica: Prácticas con PC ARC/INFO e IDRISI. Ed. Rama. España. 430 pp.

Calvo Melero, L. 1993. Sistemas de información geográfica digitales: Sistemas geomáticos. Ed. Universidad de Murcia. España.

Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. Nociones introductorias a la teledetección (principios físicos), interpretación y explotación de datos, análisis visual y tratamiento digital. (3ª ed.). Editorial Rialp, Madrid, 586 pp.

Comas, D. y E. Ruiz. 1993. Fundamentos en Sistemas de información Geográfica. Editorial Ariel. Barcelona.

Date, C. 1986. An introduction to database systems. The systems programming series. Addison-Wesley.

Degioanni, A.J. 2001. Sistemas de Información Geográfica. Material Didáctico del Curso Cartografía Digital. Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.

Eastman, J. 1997. IDRISI, A grid based geographic analysis system, version for Windows. Clark University. USA.

ESRI. 1994. Introduction to ArcView, California. USA.gbif. 2012. Global Biodiversity Information Facility in Spain. http://www.gbif.es/ficheros/TallerSiG-Geolocate2011/CuadernilloSIG_2011.pdf Fecha de última consulta Abril 2012.

González, J.; Robinson, T.; Cantero, J.; Cholaky, C. y J. Cisneros. 2002. Utilización de los SIG en la gestión de recursos naturales en una cuenca serrana del centro de Argentina. Revista UNRC. Volumen 22 N° 1-2.

Instituto Geográfico Nacional. 2011. Proyección Gauss Krugger. http://www.ign.gob.ar /AreaServicios/Publicaciones. Fecha de última consulta Abril 2012.

ITC textbook. 1978. VII-6 Terrains analysis and classification usin aerial photographs. International Institute for Aerial survey and earth sciences. Capítulo 19. 243 pp.

Maguire, D. 1991. An overview and definition of GIS.En: D. Maguire, M.;Goodchild y D. Rhind (EDS) Geographical Information Systems, Vol 1. Longman. New York.

Meijerink, A.; Brouwer, H.; Mannaerts, C. y C.Valenzuela, 1994. Introduction to the Use of GIS for Practical Hydrology, ITC:Publication Number 23. The Netherlands. Pp 1-11.

Moldes, J.F. 1995. Tecnología de los Sistemas De Información Geográfica. Ed. Rama. Madrid.

Muñoz Nieto, A. 2006. Teledetección: Nociones y Aplicaciones. Editorial Universidad de Salamanca. España.

Myhre, S.; Shih, S. y D. Still. 1992. Using Remote Sensing and Geographical Information System in Water-Quality Assessment. Soil Crop. Sci Soc. Florida Proc. 51:34-38.

NCGIA National Center for Geographic Information and Analisis. 1990. M. Goodchild y K. Kemp (Eds). Vol. 1. Universidad de California, USA.

Porta J.; López-Acevedo y C.,Roquero 1994. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 807 pp.

Puebla G.J. y M. Gould. 1994. Sistemas de Información geográfica. Síntesis. Madrid.

Ramos Reyes, R. 2012. *Ecosur.mx*. http://www.ecosur.mx/ecofronteras/ ecofrontera /ecofront32/Potencialidaddesistemas.pdf Fecha de última consulta Abril 2012.

Valenzuela, C. 1994. Revista del proyecto de SIG para el ordenamiento territorial forestal N°3, 6-32. SIG-PAFC. Colombia.

Wikipedia. 2012. Sistema de Información Geográfica. http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_Informaci%C3%B3n_Geogr%C3%A1fica#Comparativa_de_software_SIG. Fecha de última consulta Abril 2012.



Erosión hídrica

Principios y técnicas de manejo

José Cisneros. Carmen Cholaky. Alberto Cantero Gutiérrez
Jorge González. Miguel Reynero. Alejandro Diez
Leonardo Bergesio.
Coautores del Capítulo 7: Juan José Cantero. César Nuñez
Andrea Amuchástegui.
Coautores del Capítulo 8: Américo Degioanni

La erosión es un problema que afecta a la región central del país, con preeminencia en la zona de influencia de la Universidad Nacional de Río Cuarto, y pone en riesgo la sustentabilidad de todo el sistema productivo.
"Erosión Hídrica. Principios y técnicas de manejo" comprende una actualización de los conocimientos sobre la física de la erosión hídrica, y los fundamentos hidrológicos para caracterizar el comportamiento de las cuencas sujetas a este proceso. Se exponen los principales modelos que permiten caracterizar y cuantificar las tasas de erosión y de escurrimiento, como base para la planificación de medidas de ordenamiento y de control.
El libro está destinado a estudiantes de grado y posgrado de Ingeniería Agronómica, y de carreras vinculadas al ordenamiento territorial y gestión ambiental. Su nivel de profundidad lo hace apto para técnicos dedicados al diseño de pequeñas obras hidráulicas, control de erosión en cuencas agrícolas y manejo agronómico de suelos.
Los autores son docentes e investigadores de la Universidad Nacional de Río Cuarto; algunos de ellos acreditan más de treinta años de trayectoria en la temática de la erosión y sus trabajos son consultados por expertos del país y del exterior.

Colección Académico-Científica



ISBN 978-987-688-024-4



